

ЗЕМЛЯ И

№ 3 (339)
МАЙ-ИЮНЬ, 2021

космонавтика
астрономия
геофизика

ISSN 0044-3948

ВСЕЛЕННАЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ
НА ЗЕМЛЕ, В КОСМОСЕ И НА ЛУНЕ

КОУРОВКА – ОБСЕРВАТОРИЯ И АСТЕРОИД

АКАДЕМИК В.Е. ФОРТОВ
И МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОЕКТ «Vega»

ЕСТЬ ЛИ ЖИЗНЬ НА... ВЕНЕРЕ?
ДОСТИЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ АСТРОМЕТРИИ
СОЛНЕЧНАЯ И ЗВЕЗДНАЯ АКТИВНОСТЬ
В ОЖИДАНИИ СЮРПРИЗОВ

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№3 (333)

МАЙ-ИЮНЬ, 2021

ISSN 0044-3948

космонавтика
астрономия
геофизика

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва

В НОМЕРЕ:

Колонка главного редактора 3

КОЦЮРБЕНКО О.Р. Есть ли жизнь на... Венере? 6

ЦВЕТКОВ А.С. Достижения современной
астрометрии 21

КАЦОВА М.М., СОКОЛОВ Д.Д. Солнечная
и звездная активность в ожидании сюрпризов 39

ИПАТОВ А.В., ВЕДЕШИН Л.А. Перспективы
использования радиотелескопов на Земле,
в космосе и на Луне 52

Обсерватории, институты

ГОРДА С.Ю., СОБОЛЕВ А.М., КУЗНЕЦОВ Э.Д.
Коуровка – обсерватория и астероид 66

Люди науки

САГДЕЕВ Р.З., ЗЕЛЕНый Л.М., ПОПЕЛЬ С.И.
Академик В.Е. Фортов и международный проект
«Вега» 76

История науки

СЕЛИВАНОВА О.В. Пионеры ракетной техники.
Документы личного фонда Ф.А. Цандера
в Архиве РАН 92

По выставкам и музеям

КАСАТКИНА С.В., САЧКОВ М.Е. Музей
Ф.А. Бредихина в Заволжье. К 190-летию со дня
рождения великого астронома 98

Table of Content and Selected Abstracts 110

На стр. 1 обложки:

Поверхность Венеры
в представлении художника.

Источник: ESA/AOES (<https://phys.org>)

© Российская академия наук, 2021

© Редколлегия журнала «Земля и Вселенная» (составитель), 2021

© ФГУП «Издательство «Наука», 2021

Редакционная коллегия:

главный редактор
академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,
летчик-космонавт
П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора
кандидат филолог. наук
О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук
К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт
А.Ю. КАЛЕРИ,
кандидат физ.-мат. наук
О.Ю. ЛАВРОВА,
доктор физ.-мат. наук
А.А. ЛУТОВИНОВ,
зам. главного редактора
доктор физ.-мат. наук
О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук
И.Г. МИТРОФАНОВ,
академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН
И.Д. НОВИКОВ,
доктор физ.-мат. наук
С.П. ПЕРОВ,
доктор физ.-мат. наук
К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук
М.В. РОДКИН,
научный директор
Московского планетария
Ф.Б. РУБЛЁВА,
член-корр. РАН
А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корр. РАН
О.Н. СОЛОМИНА,
член-корр. РАН
В.А. СОЛОВЬЁВ,
академик
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук
В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН
Б.М. ШУСТОВ

Editorial Board:

Editor-in-chief
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK
Dr. Konstantin V. IVANOV
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI
Dr. Olga Yu. LAVROVA
Dr. Alexander A. LUTOVINOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Oleg Yu. MALKOV
Dr. Igor G. MITROFANOV
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV
RAS Corr.Member Dr. Igor D. NOVIKOV
Dr. Stanislav P. PEROV
Dr. Konstantin A. POSTNOV
Dr. Mikhail V. RODKIN
Faina B. RUBLEVA
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH
RAS Corr. Member Dr. Olga N. SOLOMINA
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

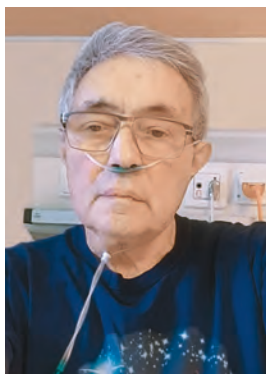
Колонка главного редактора

Дорогие читатели, коллеги, друзья!

Не пугайтесь, пожалуйста, – все под контролем отечественной медицины, – но пишу я эту колонку из больницы, куда попал с довольно сильной пневмонией. Жалею, что не привился «Спутником-5» вовремя, да и маски носил сикось-на-кось. Так что не повторяйте, пожалуйста, моих ошибок – кто бы ожидал пару лет назад, что нашу жизнь так изменят не астероиды, изменения климата и инверсии магнитного поля Земли, а какой-то мерзкий вирус с Уханьского рынка.

Эту колонку я решил все-таки посвятить Венере, хотя в номере ей посвящена всего одна, но знаковая статья Олега Коцюрбенко, рассказывающая о возможности найти следы биологической активности в облачном слое Венеры. Пик спора о возможном открытии таких следов – газа фосфина – пришелся на осень прошлого года, но оживленные, даже ожесточенные диспуты не стихают и сегодня. Только что я получил один взвешенный текст известного «венеролога» Дирка Шульце (Dirk Schulze-Makuch) из Берлина, озаглавленный «Аргументы за (или нет) жизнь в облаках Венеры»¹.

Прямой ответ, конечно, дадут только прямые измерения на аэростатах или спускаемых аппаратах, которые планируются в новой российской программе исследования Венеры, начинающейся в конце 2020-х годов экспедицией «Венера-Д»



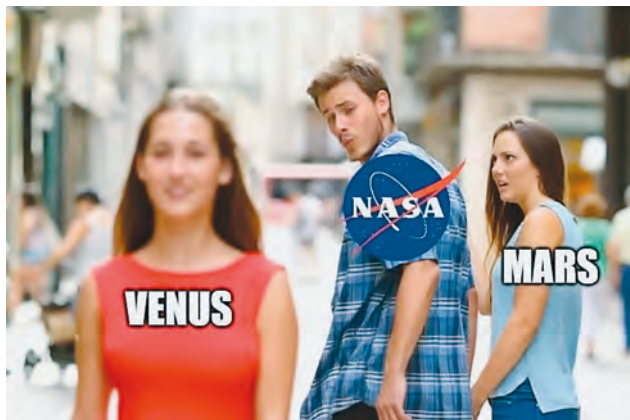
(подробнее о ней мы расскажем в одном из ближайших номеров). Вообще, Венера становится самой «модной» планетой. В интернете почти сразу возник шуточный постер, где ветреный плейбой НАСА быстро охладевает к марсианской девушке и готов бежать за новой пассией – Венерой. Однако я надеюсь, что эта планета сохранит статус «русской»,

заработанный в великие годы советского планетного прорыва.

Для меня и, к сожалению, других, пока не очень многочисленных сторонников идей Леонида Васильевича Ксанфомали (1932–2019)² интерес к Венере подогревается и указаниями на существование каких-то активных динамических структур на самой поверхности Венеры. Думаю, читатели помнят и о трудно

² In memoriam. Леонид Васильевич Ксанфомали (28.01.1932–07.09.2019). *ЗиВ*, № 6, 2019.

«Мем», получивший распространение после того, как NASA высказало чрезвычайную заинтересованность в исследованиях Венеры и поиске там следов биологической активности



¹ The Case (or Not) for Life in the Venusian Clouds by Dirk Schulze-Makuch. *Life*. 2021. 11(3), 255; <https://doi.org/10.3390/life11030255>



Стругацкий Аркадий, Стругацкий Борис.
Страна багровых туч. Первое издание,
1960 год. Изображение с сайта rusf.ru/abs

представляемых обыденным сознанием температурах (~500 °C) и давлениях (~100 атм.), которые, казалось бы, лишают смысла все такие идеи. Но обыденное сознание часто подводит, и природа может удивить нас и неожиданным, и непредсказуемым. Мы с Л.В. и коллегами из Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН в Новосибирске написали об этом большую статью в «Успехах физических наук»³. В двух словах, ее смысл сводится к следующим положениям: жизнь многообразна; жизнь – это самоорганизация; в условиях Венеры она может принимать самые причудливые формы,

³ Ксанфомалити Л.В., Зелёный Л.М., Пармон В.Н., Снытников В.Н. «Гипотетические признаки жизни на планете Венера: ревизия результатов телевизионных экспериментов 1975–1982 гг.» УФН 189 403–432 (2019) <https://ufn.ru/ru/articles/2019/4/f/>

основанные не на углероде и воде (как привычные нам земные формы).

Конечно, без прямых экспериментов здесь не обойтись. В проекте «Венера-Д» запланировано получение высококачественных детальных панорам венерианской поверхности, которые могут подтвердить (или опровергнуть) результаты анализа фотоснимков, сделанных советскими посадочными аппаратами «Венера» в 1960–70-е гг. Те, проанализированные Л.В. Ксанфомалити, панорамы пятидесятилетней давности, полученные практически на всех посадочных модулях, добравшихся до поверхности, сначала черно-белые, а потом и цветные, и сейчас поражают своим высоким качеством. Телевизионные системы для венерианской программы были разработаны замечательным инженером и ученым Арнольдом Сергеевичем Селивановым в НИИ космического приборостроения (о нем и его работах мы также расскажем на страницах ЗиВ).

Для меня персонально Венера началась с первой повести братьев Стругацких «Страна багровых туч», наивной, написанной перед самым началом космической эры, – но в которой уже чувствовался их яркий талант и искренний патриотизм.

Реальная история советских исследований Венеры также полна трагедий и внутреннего драматизма, и, я уверен, будучи экранизирована, она станет не меньшим блокбастером, чем, например, недавний «Манхеттен», посвященный созданию атомной бомбы в США. Решение Сергея Павловича Королёва о передаче всей межпланетной тематики, главным образом, лунной и венерианской, другому главному конструктору Георгию Николаевичу Бабакину вряд ли далось ему просто, тем более что неудачи продолжались. Даже когда аппараты долетали до самой планеты, поверхности они не достигали: при снижении их раздавливало атмосферное давление, которое не могли тогда представить даже самые искушенные теоретики.

Официальная советская пропаганда рапортовала только об успехах, а неудачи обходила фигурами умолчания.

Наверное, есть еще ветераны, которые помнят те трагические и героические дни... Но «все-таки мы победили», и 17 марта 1970 г. «Венера-7» впервые «привенерилась» на «Планете бурь». Надеюсь, что в 2029–2030 гг. усилиями новых поколений проектантов и конструкторов той же «бабакинской фирмы» – НПО им. Лавочкина отечественная станция «Венера-Д» окажется на раскаленной поверхности планеты. Было приятно, когда руководитель Роскосмоса Д.О. Рогозин отметил, как горят глаза «лавочкинской молодежи», когда они обсуждают венерианские проекты. «Планета бурь», Венера, по-прежнему ставит перед нами непростые задачи, решение которых потребует и умения, и выдержки, и – смелости.

В заключение же вспомню еще один прекрасный, почти лирический сюжет, связанный с Венерой, из воспоминаний И.С. Шкловского⁴. После первого удачного запуска советской ракеты к Венере в 1961 г. его попросили написать статью для «Известий». И.С. согласился, но с условием, что газета напечатает все, что будет написано. Свою статью он начал цитатой из стихотворения Н.С. Гумилева, тогда «запретного»:

На далекой звезде Венере
Солнце пламенней и золотистей,
На Венере, ах, на Венере
У деревьев синие листья.
Всюду вольные звонкие воды,
Реки, гейзеры, водопады
Распевают в полдень песнь свободы,
Ночью пламенеют, как лампы.

⁴ Читатели могут прочитать его в изложении самого И.С. в его книге «Эшелон», глава «На далекой звезде Венере».



Предварительная компоновка научной аппаратуры на посадочном модуле аппарата «Венера-Д»

Я в те годы был активным участником «самиздата» (за что чуть не вылетел из МФТИ), знал, кажется, наизусть половину Гумилева, и конечно, и это космическое стихотворение. Было удивительно увидеть их напечатанными, пусть даже анонимно. Самому же Иосифу Самойловичу история принесла неожиданное разочарование. Экземпляр газеты он отправил Анне Ахматовой, чтобы обрадовать ее первым появлением стихов пусть и бывшего, но мужа в советской газете. Но – ответа не получил, и только через много лет узнал, что Ахматова относилась к этим стихам, говоря мягко, сдержанно, потому что Николай Гумилев посвятил весь цикл другой женщине...

А я очень надеюсь, что современные поэты совсем скоро напишут поэмы о настоящей, 100-атмосферной раскаленной Венере. Не совсем дантовский ад, — но похоже.

Главный редактор журнала
«Земля и Вселенная»
академик Лев Матвеевич Зелёный

ЕСТЬ ЛИ ЖИЗНЬ НА... ВЕНЕРЕ?



КОЦЮРБЕНКО Олег Ролландович,

доктор биологических наук, профессор,
Югорский государственный университет

DOI: 10.7868/50044394821030014



Среди космических объектов Солнечной системы, на которых предполагается существование каких-либо форм жизни, Венера долгое время не представляла особого интереса. Экстремально высокие температура и давление на поверхности, атмосфера, состоящая из мелкодисперсных капель серной кислоты – все это, казалось бы, делало планету абсолютно не пригодной для существования живых организмов земного типа. Однако новые данные астрофизических исследований и основанные на них теоретические разработки привели к резкому повышению значимости Венеры для астробиологов. Основной интерес для исследователей, занимающихся поиском внеземной жизни, связан с облачным слоем Венеры толщиной в 20–25 км, в котором, несмотря на довольно жесткие условия, должен выживать ряд земных микроорганизмов, относящихся к экстремофилам. В российской космической программе по исследованию Венеры, целью которой является запуск к этой планете космических аппаратов в 2028–2030 гг., планируются астробиологические эксперименты. В них предполагается обнаружить различные биомаркеры в облачном слое, чтобы попытаться ответить на вопрос: есть ли жизнь на Венере?

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ АСТРОБИОЛОГИИ ВЕНЕРЫ

Проблема поиска внеземной жизни, как правило, связывалась с изучением Марса – планеты, условия на которой относительно близки к земным. Позднее, после информации о вероятном существовании подповерхностных океанов на различных спутниках

внешних планет Солнечной системы, и прежде всего на Европе и Энцеладе, границы поиска жизни существенно расширились. Венера долгое время не рассматривалась в качестве планеты для активного поиска каких-либо живых организмов. Температура на ее поверхности чрезвычайно высокая (470 °C), а среднее атмосферное давление составляет 90 атм, что делает поверхность планеты непригодной для

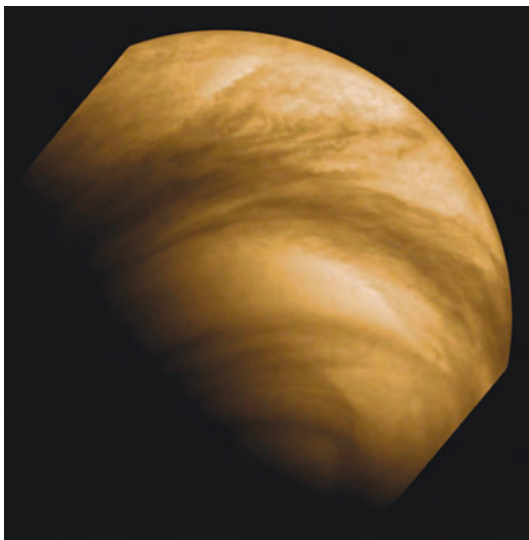
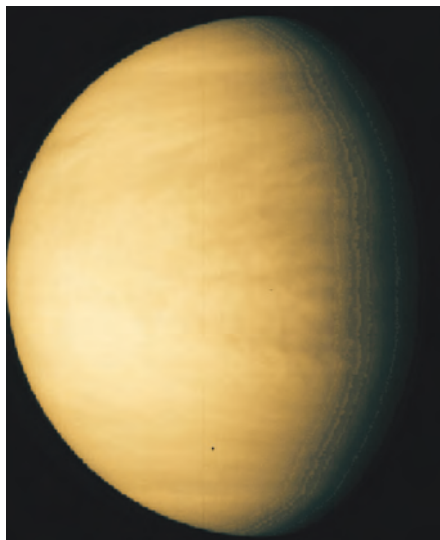


Рис. 1. Фотографии Венеры в видимом свете, сделанные космическими аппаратами в видимом свете (Galileo, NASA, 1990 г., слева) и в ультрафиолетовом диапазоне (Venus Express, ESA, 2011 г., цвет отредактирован, справа). В первом случае виден только плотный слой облаков, тогда как во втором четко фиксируются темные области в облаках, разной интенсивности поглощения, которые одновременно меняют свою интенсивность во времени. В настоящее время природа поглотителя точно не установлена. Источники: NASA, Galileo, Copyright Calvin J. Hamilton <https://apod.nasa.gov/apod/ap950815.html> (слева); ESA/MPS/DLR/IDA (справа)

существования жизни в той форме, как мы ее знаем на Земле. Есть гипотеза, предложенная российским ученым Л. Ксанфомалити, которая допускает существование жизни на поверхности Венеры в другой органической форме, стабильной при высоких температурах, однако, такая гипотетическая химия жизни практически не изучена и может рассматриваться чисто умозрительно.

Уникальность Венеры состоит в том, что она имеет плотный и достаточно стабильный слой облаков, физико-химические условия в котором уже намного ближе к земным и могут быть подходящими для существования живых организмов.

Гипотеза об обитаемости венерианских облаков была впервые высказана в 1960-х годах американскими учеными – биофизиком Гарольдом Морови-

цем (Morowitz) и астрономом Карлом Саганом (Sagan)¹ – и далее получила свое развитие в конце 1990-х благодаря астробиологам американцу Дэвиду Гринспуну (Grinspoon) и англичанину Чарльзу Кокеллю (Cockell). Важным этапом в контексте развития этой гипотезы является открытие в нем не установленного компонента, поглощающего в УФ-диапазоне, причем с длиной волны, характерной для известных белковых структур (рис. 1). Пока ни один спектр поглощения других соединений, присутствие которых в облачном слое Венеры надежно доказано учеными, не подошел по своим характеристикам для объяснения этого

¹ Morowitz H. and Sagan C. (1967). Life in the clouds of Venus? In *Nature* (Vol. 215. Issue 5107. P. 1259–1260). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/2151259a0>

явления, и, следовательно, не существует веских аргументов для опровержения гипотезы его биологического происхождения, обобщенной в 2018 г. в работе Санджая Лимае (Limaye)², что побуждает астробиологов к активному изучению необычной венерианской системы облаков.

КОНЦЕПЦИЯ ОБИТАЕМОСТИ В ОТНОШЕНИИ СИСТЕМЫ ВЕНЕРИАНСКИХ ОБЛАКОВ

При оценке возможности обнаружения внеземной жизни на различных космических телах ученые часто используют концепцию обитаемости, предложенную Коккелем, которая рассматривает возможность существования живого организма в какой-либо среде, при обязательном сочетании в ней ряда необходимых для этого условий, к которым относится наличие: 1) растворителя для биохимических реакций; 2) соответствующих физико-химических параметров среды; 3) доступной энергии; 4) биологически значимых элементов и, в первую очередь, CHNOPS-группы.

В качестве универсального растворителя рассматривается вода – соединение, которое абсолютно необходимо для единственной известной нам формы жизни. Другие возможные соединения, имеющие функции растворителя, обсуждаются астробиологами чисто гипотетически. Наличие жидкой воды – это важное указание на то, что такая среда могла бы, в принципе, поддерживать протекание биохимических реакций.

В настоящее время жидкой воды на поверхности Венеры нет из-за очень высоких температур, но она присутст-

вует в ее атмосфере в виде водяного пара, хотя и в довольно низкой концентрации, примерно 40–200 частей на миллион. Однако венерианский слой облаков характеризуется наличием, помимо воды, достаточного количества серной кислоты. Характерным свойством серной кислоты является ее гигроскопичность, что означает возможность формирования мелкодисперсных капель, которые могут содержать некоторое количество жидкой воды, потенциально доступной для гипотетических венерианских организмов.

Теоретические расчеты показывают, что значения активности воды (отношение давления паров воды над определенным материалом к давлению паров над чистой водой при одной и той же температуре, обозначаемое α_w) в таких каплях могут не превышать ее критического значения для земных форм жизни и, таким образом, способствовать развитию живых организмов.

Исходя из имеющихся на настоящий момент данных о физико-химических параметрах атмосферы Венеры, ее облачный слой представляется намного менее агрессивной (по сравнению с поверхностью) средой, в которой значения температуры и давления находятся соответственно в диапазонах $-45 \div +90^\circ\text{C}$ и 0.01–2 атм, и имеются зоны, вполне пригодные для существования земных организмов. Наиболее горячие нижние слои венерианских облаков имеют максимальную температуру, не превышающую 90°C . Некоторые земные микроорганизмы способны выживать и даже активно развиваться при более высоких температурах, как например, археи *Geogemma barossii* или *Methanopyrus kandleri*, размножающиеся при 120°C . Значения давлений в облачном слое Венеры вообще сложно назвать экстремальными, так как микроорганизмы способны вы-

² Limaye S.S. et al. Venus' spectral signatures and the potential for life in the clouds. *Astrobiology*. 18, 1181–1198 (2018)

живать даже в условиях высокого космического вакуума.

Наиболее экстремальным параметром среды, который необходимо учитывать прежде всего, является высокая кислотность (концентрация ионов водорода). Значения pH во всем слое венерианских облаков находятся на чрезвычайно низком уровне для земных организмов, от 0.5 до -1.3. На настоящий момент известны земные микроорганизмы, для которых нижняя граница значений pH, при которых они способны выживать, ниже верхнего значения в системе венерианских облаков. Так, анаэробная архея *Acidianus sulfidivorans* способна существовать при pH = 0.35, а аэробные археи рода *Picrophilus* – даже при pH = -0.06. Существует еще ряд организмов, которые способны расти при pH, близком к 0.5, и одновременно при высоких температурах. Очевидно, что не все организмы еще изучены, и вполне вероятно, что будут обнаружены какие-либо формы, способные развиваться и при более низкой кислотности среды. Таким образом, не существует принципиальной невозможности для микробных форм жизни выживать в условиях сверхнизкого pH.

Важным вопросом является определение доступного источника энергии для осуществления гипотетических биологических процессов в облачном слое Венеры. Предполагается, что микробные формы в такой системе могут развиваться за счет двух основных процессов – фотосинтеза и хемосинтеза. В первом случае организмы используют энергию солнечного излучения, а во втором – энергию химических реакций. Поскольку в системе венерианских облаков не зафиксировано каких-либо значимых количеств кислорода, главную роль в энергетических процессах должны играть другие элементы. Астробиологи прежде всего

рассматривают соединения серы и железа, обнаруженные в венерианской атмосфере, участие которых в окислительно-восстановительных реакциях может использоваться организмами для получения необходимой им энергии по аналогии с такими процессами на Земле. По существу, эти два элемента могут играть центральную роль в биогеохимических циклах в облачном слое Венеры. Однако общая картина метаболических циклов может быть сложнее, если включить в них реакции с соединениями азота, который в данном случае может заменить кислород в качестве главного окислителя. В реакциях восстановления соединения азота могут, с одной стороны, участвовать в регенерации окисленных форм серы и железа и, таким образом, поддерживать центральные циклы элементов, а с другой стороны, – компенсировать до некоторой степени кислую реакцию окружающей среды при образовании ионов аммония.

Наиболее вероятный тип метаболизма в описанных выше условиях и при дефиците органики определяется как хемолитоавтотрофный, при котором источником энергии являются химические окислительно-восстановительные реакции различных неорганических соединений (более подробно ниже в тексте), а источником углерода – CO₂, основного газа в атмосфере Венеры (рис. 2).

Сложную картину биохимических циклов могут дополнить реакции бескислородного фотосинтеза, также приводящие к образованию окисленных форм серы и железа. Поток ультрафиолетового излучения, и в частности, в диапазоне поглощения основных фотосинтетических пигментов – хлорофилла и каротиноидов, очень интенсивный в верхних слоях облачного слоя и превосходит такой поток на Земле примерно в два раза.

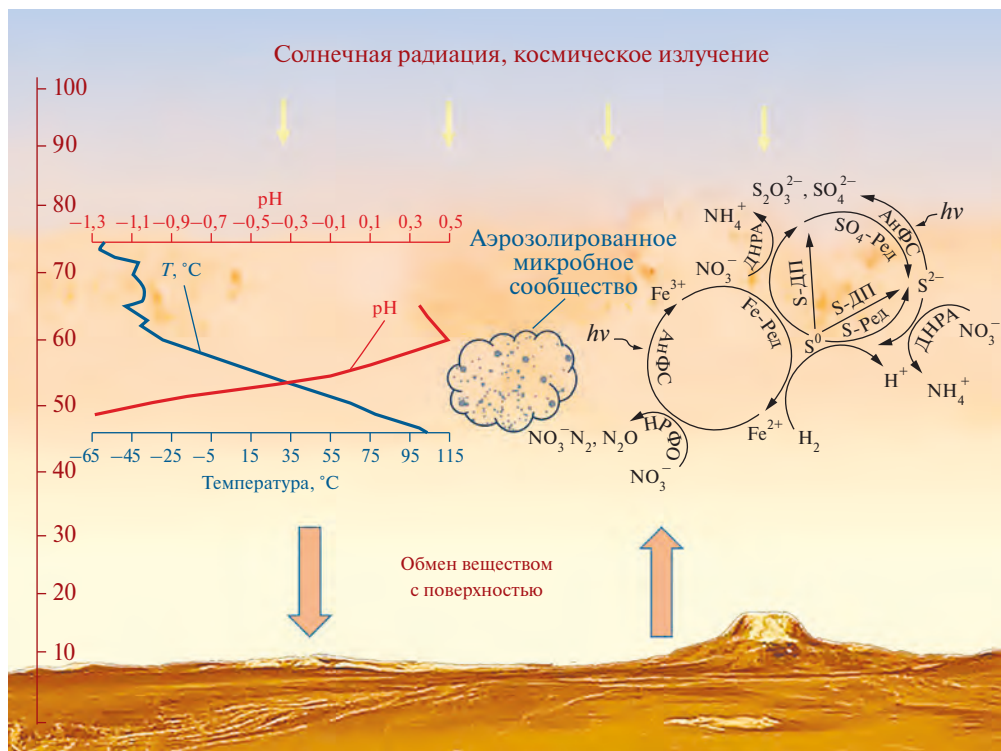


Рис. 2. Аэрогеохимическая схема функционирования гипотетического микробного сообщества в облачном слое Венеры. Микроорганизмы существуют преимущественно в нижнем слое облаков, осуществляя метаболические реакции, в которых неорганические соединения используются для получения энергии, а фотосинтетическая энергия в доступной форме поступает из верхних слоев. В результате различных физических атмосферных процессов осуществляется постоянный обмен веществом между облачным слоем и поверхностью, дополнительно стимулирующий микробную активность. $\text{SO}_4\text{-Ред}$ – сульфатредукция, Fe-Ред – железоредукция, S-Ред – сероредукция, S-ДП – диспропорционирование серы, ДНРА – диссимилиационная нитратредукция до аммония, НРФО – нитратредукция при окислении Fe^{2+} , АнФС – аноксигенный фотосинтез. Циклы биохимических реакций в облаках представлены в статье Коцюбенко и др.¹ Данные значений температуры и pH взяты из статей Гринспуна и Буллока (Greenspoon and Bullock, 2007) и Лимае (Limaye, 2018) соответственно

Кроме УФ-излучения, верхние слои подвергаются существенному воздействию солнечной радиации и космического ионизирующего излучения, которые в отсутствии магнитного поля планеты могут привести к повреждению или разрушению биоло-

гических клеточных форм. В этом отношении нижние слои венерианских облаков представляются более стабильной зоной, в которой суммарная радиация значительно снижается благодаря ее поглощению верхними слоями.

¹ Kotsyurbenko O.R., Cordova Jr. J.A., Belov A.A., Cheptsov V.S., Khrunyk J., Kölbl D., Kryuchkova M.O., Milojevic T., Mogul R., Sasaki S., Słowik G.P., Snytnikov V., Vorobyova E.A. (2021) Exobiology of Venus clouds: new insights into habitability through terrestrial models and methods of detection. *Astrobiology*. In press

Элементы и соединения, обнаруженные в атмосфере Венеры

Элементы и соединения	Авторы и год открытия
H ₂ O	Виноградов, 1968
CO	Oyama, 1980
CO ₂	Oyama, 1980
COS	Мухин, 1983
N ₂	Oyama, 1980
O ₂	Oyama, 1980
P	Андрейчиков, 1987
P ₂ O ₅ + H ₃ PO ₄	Краснопольский, 2006
S ₈	Андрейчиков, 1987
H ₂ SO ₄	Поршнеv, 1987
SO ₂	Barker, 1979
Cl	Сурков, 1982
Fe	Андрейчиков, 1987
FeCl ₃	Засова, 1981

Важным аргументом в пользу возможности существования биологических форм в облачном слое Венеры является открытие в нем в рамках различных космических советских («Венера», «Вега») и американских программ (*Pioneer*) наличия всех необходимых для жизни элементов – углерода, водорода, азота, кислорода, фосфора и серы. Как показано в таблице, эти элементы были обнаружены в виде различных соединений и в совокупности составляют основу всех биомакромолекул в живых организмах, таких как ДНК, РНК, белки и др. Важным было открытие соединений железа, которые могут участвовать в метаболических реакциях, входя в состав каталитических центров или непосредственно участвуя в энергодающих окислительно-восстановительных реакциях.

Таким образом, потенциально обитаемая зона может распределяться практически по всему облачному слою Венеры, в котором микробные формы могут развиваться в системе мелкодисперс-

ных аэрозолей, состоящих из водного раствора серной кислоты. Фактически условия для жизни в таких системах ограничены только наличием химических веществ, необходимых для поддержания различных метаболических циклов. При учете распределения основных химических компонентов, пониженной радиации и наличия компонентов неустановленной природы, поглощающих в диапазоне сложных биологических молекул, именно нижний самый горячий слой венерианских облаков считается наиболее вероятной зоной обитания возможных микробных форм.

АЭРОГЕОХИМИЧЕСКИЙ СПОСОБ СУЩЕСТВОВАНИЯ ВЕНЕРИАНСКИХ ОРГАНИЗМОВ

При изучении облачного слоя Венеры в отношении его возможной обитаемости в качестве модельной системы мы можем рассматривать атмосферу нашей Земли. Облака – ключевой компонент атмосферы Земли, покрывающий 60% поверхности. Они состоят из микроскопических капель жидкой воды, кристаллов льда или комбинации обеих фаз; средний диаметр капель составляет 5–50 мкм, что в целом сопоставимо с размером аэрозолей на Венере. Водные аэрозоли содержат различные неорганические и органические соединения, потенциально доступные для использования микроорганизмами. Основными неорганическими ионами, обнаруженными в водной фазе облаков, являются катионы щелочных и щелочноземельных металлов (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) и аммония (NH₄⁺), а также анионы сульфата (SO₄²⁻), хлорида (Cl⁻) и нитрата (NO₃⁻). Среди органических соединений обнаруживаются карбоновые кислоты, которые способствуют подкислению водной среды так, что значение pH в ней может варьировать от 2.2 до 7.

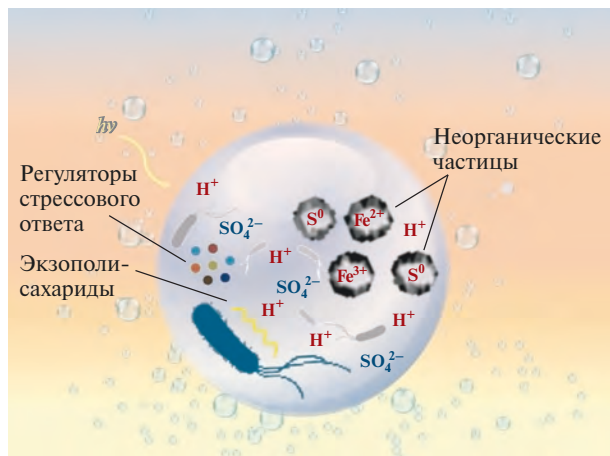


Рис. 3. Гипотетическая схема существования микроорганизмов в аэрозолях венерианского облачного слоя. Микроорганизмы существуют в условиях постоянного воздействия различных стрессовых факторов, имея эффективные механизмы защиты и получают энергию за счет фото- и хемотрофного типа метаболизма

Аэрозоли в атмосфере Земли активно заселяются различными микроорганизмами – бактериями, грибами и вирусами, концентрация которых в водной фазе обычно находится в пределах от 1×10^3 до 1×10^5 клеток/мл. Их присутствие в атмосфере подтверждалось вплоть до 77 км. Микроорганизмы адаптируют свой метаболизм к химическому составу и условиям в аэрозолях и активно взаимодействуют с их химическими компонентами, осуществляя биотрансформацию органических соединений. Благодаря механизмам испарения-конденсации в облаках может происходить обмен микробных метаболитов между различными аэрозолями. Такие же процессы возможны в облачном слое Венеры.

В земной атмосфере микроорганизмы подвергаются различным стрессовым воздействиям: быстрым изменениям температуры и давления, постоянно замораживания/оттаивания,

повышенному солнечному излучению (особенно ультрафиолетовому) и высыханию, а также действию различных химических окислителей, таких как H_2O_2 , O_3 , радикала OH и др., токсинов и кислой реакции среды. Противостоять всем этим факторам стресса микроорганизмы способны за счет активации у них различных защитных механизмов: синтеза осмо- и термопротекторов, антиоксидантов или экзополимерных веществ, повы-

шающих гидрофильность поверхности клетки. Спорообразование также может быть механизмом временного выживания в неблагоприятных условиях.

Важной особенностью земных облаков является их нестабильность. Они существуют в качестве более или менее структурированной системы от нескольких часов до нескольких дней, поэтому жизненный цикл микроорганизмов в земной атмосфере должен осуществляться очень быстро. В отличие от Земли, облачный слой на Венере считается хотя и очень динамичной, но достаточно стабильной системой при всех ее экстремальных физико-химических параметрах. Однако при этом на Венере поверхность не может быть источником новых микробных клеток, которые в земных условиях за счет различных процессов могут переносится в атмосферу. Венерианское сообщество микроорганизмов должно представлять собой относительно изолированную, достаточно стабильную систему. Микроорганизмы Венеры вынуждены научиться противостоять постоянному воздействию местных стрессовых факторов и поддерживать свою биомассу на необходимом для выживания уровне, компенсируя ее неизбежную потерю в результате атмосферных обменных процессов (рис. 3).

Оригинальная схема жизненного цикла венерианских микроорганизмов была предложена американскими и английскими учеными, которые предположили инициацию образования покающихся форм (спор или цист) микроорганизмов по мере движения содержащих их аэрозолей вниз в горячие слои, где водная фаза испаряется. Оказавшись в атмосфере, высушенные легкие споры под воздействием конвекционных потоков, направленных вверх, вновь попадают в благоприятные физико-химические условия и становятся центрами конденсации. Образовавшиеся водные аэрозоли постепенно увеличиваются в объеме, и микробная активность возобновляется после прорастания спор. Предполагается, что такой микробный цикл должен поддерживать биомассу в достаточном для существования микробной системы в облаках Венеры.³

Впрочем, изоляция венерианских организмов в облаках может быть только условной. Очевидно, что из-за сильных конвекционных потоков, огромной силы ветров и других атмосферных процессов должен существовать постоянный обмен веществом между поверхностью планеты и ее облачным слоем. Для живых организмов эти процессы могут быть важными источниками необходимых химических элементов, вовлеченных в метаболические реакции. Очевидно, что при всей его стабильности облачный слой имеет ограниченное количество вещества, и такие обменные процессы могут способствовать стабилизации гипотетической микробной системы.

³ Seager S., Petkowski J.J., Gao P., Bains W., Bryan N.C., Ranjan S., & Greaves J. (2020). The Venusian Lower Atmosphere Haze as a Depot for Desiccated Microbial Life: A Proposed Life Cycle for Persistence of the Venusian Aerial Biosphere. *Astrobiology*. doi:10.1089/ast.2020.2244

Считается, что такая сильная зависимость микробных форм от геохимических процессов планеты была характерна для самых ранних этапов биологической эволюции на Земле и сейчас присутствует в ряде земных экосистем, в которых экстремальные параметры среды (высокая температура и/или низкий pH) сильно ограничивают развитие живых организмов и являются местобитанием экстремофилов – специфической микробной группы, освоившей экологические ниши, недоступные другим земным формам жизни, и активно использующей хемолитотрофный тип метаболизма, основанный на использовании энергии химических реакций неорганических соединений.

Сообщество гипотетических венерианских организмов, обитающих в облачном слое, можно уверенно отнести к этой группе, а специфика их местобитания дает возможность охарактеризовать их способ существования как аэрогеохимический. При этом они могут сами сильно влиять на свое микроокружение, продуцируя различные метаболиты, такие как аммоний, которые могут в определенной степени компенсировать кислотность окружающей среды и повышать выживаемость. Иными словами, физическая организация аэрозолей, динамика химических компонентов в ней и обменные процессы делают систему венерианских аэрозолей уникальной в отношении поддержания условий для существования гипотетических микробных форм.

ЗЕМНЫЕ ЭКСТРЕМОФИЛЫ КАК АНАЛОГИ ВЕНЕРИАНСКИХ ОРГАНИЗМОВ

В рассуждениях о возможности существования жизни в венерианских облаках астробиологи опираются на существующие земные микробные системы,

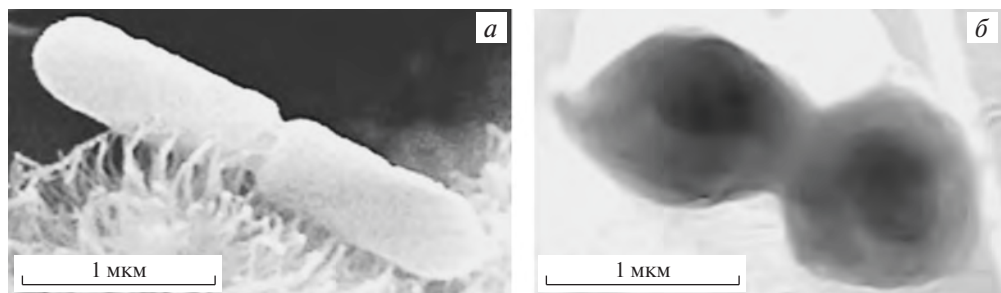


Рис. 4. Экстремофильные микроорганизмы – аналоги гипотетических организмов облачного слоя Венеры. а – бактерия *Acidithiobacillus ferrooxidans*, б – архея *Acidianus infernus*. Фотографии взяты из доступных электронных источников

которые функционируют в экстремальных условиях и могут в некоторой степени быть аналогами венерианских организмов. Несмотря на определенное структурное сходство, облака на Венере существенно отличаются от земных по физико-химическим параметрам, особенно в отношении значений температуры и pH, близким к предельным для земных организмов. Экосистемы, сходные с венерианскими по таким параметрам, – можно найти на Земле в геологически активных участках, где микроорганизмы развиваются при высокой температуре и используют различные неорганические соединения для получения энергии. Это, прежде всего, системы вторичной вулканической активности, такие как геотермальные источники, наземные и глубоководные, а также сольфатары и фумаролы, в которых минеральные компоненты способствуют сильному закислению среды. Именно из таких систем были выделены организмы, которые по своим физиологическим характеристикам, возможно, смогли бы выжить в экстремальных условиях облачного слоя Венеры. В основном они принадлежат к археям, наиболее древней группе микроорганизмов на Земле, развиваются при высоких температурах (50–90 °C) и низких значениях pH (0.5–3) и могут использовать соединения серы и железа

в окислительно-восстановительных реакциях без участия кислорода для получения энергии.

Список таких организмов пока не слишком большой и включает представителей определенной подгруппы архей – кренархеот: несколько видов рода *Acidianus* и *Stygiolobus azoricus*. Кроме того, список может быть пополнен микроорганизмом *Acidithiobacillus ferrooxidans* из группы протеобактерий, который имеет сходные с другими кандидатами физиологические характеристики и осуществляет разнообразные метаболические реакции с соединениями серы и железа в зависимости от их доступности (рис. 4). Считается, что к настоящему времени микробиологам известно не более 1% всех земных микроорганизмов, поэтому существует достаточно большая вероятность того, что в земных экосистемах обитают организмы, которые способны выдерживать еще более экстремальное сочетание параметров окружающей среды и могли бы успешно развиваться в сложных условиях венерианских облаков. Как известно, жизнь использует любые возможности для выживания и развития, и если условия являются пригодными для существования живых организмов, то можно предположить, что она этим воспользуется. Это утверждение позволяет рассматривать

не только уже известные экстремофильные микроорганизмы, но и метаболические процессы, которые потенциально могут протекать в условиях венерианской атмосферы.

По существу, гипотетические венерианские организмы должны являться полиэкстремофилами (идея, развиваемая астробиологом Е. Воробьевой и ее сотрудниками), то есть обладать эффективными механизмами выживания в агрессивной среде и противостояния множеству стрессовых факторов.

Наличие в венерианских облаках соединений серы и железа при избытке CO_2 предполагает существования циклов биохимических реакций, основанных на хемолитотрофном способе жизни, где эти элементы могут играть центральную роль.

Считается, что сера и железо играли важную роль в метаболизме самых древних земных микроорганизмов и, возможно, были энергетической основой при возникновении земной жизни, участвуя в примитивных биохимических реакциях, поддерживающих функционирование так называемого универсального общего предка живых организмов (LUCA – last universal common ancestor). В настоящее время хемолитотрофные микроорганизмы используют большое разнообразие метаболических путей для получения энергии в реакциях с различными неорганическими соединениями и играют важную роль в глобальных биогеохимических циклах на Земле.

Существует несколько метаболических процессов, осуществляемых земными микроорганизмами, которые потенциально могут протекать в венерианских облаках. Это, прежде всего, восстановление сульфата (SO_4^{2-}) с образованием сероводорода (H_2S) или сульфатредукция, сероредукция ($\text{S}^0 \rightarrow \text{S}^{2-}$); диспропорционирование серы – реакция преобразования

атома серы одновременно в окисленную и восстановленную формы; диссимиляционное восстановление нитрата до аммония (DNRA – dissimilatory nitrate reduction to ammonium); восстановление нитрата при окислении Fe^{2+} (NRFO – nitrate-reducing Fe(II) oxidation) и аноксигенный фотосинтез, который происходит без участия кислорода и требует соответствующей энергии в виде УФ-излучения. Высказывались также предположения об участии метана в биохимических реакциях.

В целом, реальная картина может быть сложнее. Для надежного моделирования возможных метаболических циклов в венерианской атмосфере и оценки доступности соединений для потенциальных живых организмов необходимы новые более точные данные по наличию тех или иных элементов и их химической форме, которые могут быть получены в ходе будущих космических полетов автоматических аппаратов к Венере.

В частности, биологические окислительно-восстановительные циклы могут быть существенно интегрированы в реакции абиогенных геохимических циклов. Доступность ключевых соединений для венерианских организмов в атмосфере может быть тесно связана с их поступлением с поверхности и приповерхностных слоев в результате различных атмосферных флуктуационных процессов, где при высокой температуре могут происходить важные реакции трансформации вещества. Так, например, элементарная сера может химически превращаться в сульфат и сульфид при температурах от 50 до 200 °C, особенно в присутствии меди в качестве катализатора. Такие реакции могут происходить как в нижних слоях облаков, так и в близких к ним слоях атмосферы, являясь источниками соединений серы для микроорганизмов.

Все предлагаемые научные гипотезы об условиях и организации микробной системы в облачном слое Венеры очень важны для подготовки космических миссий и оснащении исследовательских зондов необходимым оборудованием для детектирования ключевых биомаркеров.

БИОМАРКЕРЫ (БИОСИГНАТУРЫ) В ОБЛАКАХ ВЕНЕРЫ

Основная концепция поиска жизни на большом расстоянии от Земли связана с попыткой обнаружить характерные проявления активности живых организмов или их следы. Возможные биомаркеры или биосигнатуры для венерианской формы жизни должны быть связаны как с физиологическими, так и экологическими особенностями ее существования.

Принимая во внимание вероятные полиэкстремофильные свойства венерианских организмов, можно ожидать наличие в виде биомаркеров разнообразных соединений, которые вырабатываются при работе биохимических механизмов защиты от различных стрессовых фактов и, в частности, метаболитов и ферментов, повышающих устойчивость клетки по аналогии с земными организмами.

Одновременно способ существования в аэрозолях и зависимость от неорганических соединений предполагают взаимодействие микроорганизмов с различными частицами, содержащими, прежде всего, железо и серу. В результате взаимодействия на границе «микроорганизм–частица» создаются сложные элементоорганические комплексы, в которых основной неорганический элемент может пребывать в различных химических формах, доступных для микроорганизма. Такие структурные и химические осо-

бенности металл-микробных взаимодействий хорошо изучены у земных термоацидофильных организмов, детектируются с высоким разрешением и могут являться, по утверждению астробиолога Т. Милоевич, указанием на биологическую активность в исследуемом образце.

В процессе извлечения энергии с участием железа или серы группа земных экстремофильных архей представителей родов *Sulfolobus*, *Acidianus* и *Metallosphaera*, растущих при высоких температурах и низких pH, используют уникальные молекулы – переносчики электронов – S-содержащие хиноны, которые также можно включить в список потенциальных биомаркеров.

Для определения вышеперечисленных групп биомаркеров космический зонд должен быть оснащен высокоточной спектрометрической аппаратурой в миниатюрном исполнении, разработка которой является отдельным направлением подготовки в рамках космической программы полета к Венере. Разрабатываются также методы прямого микроскопирования сложных структур в аэрозолях, включая клеточные структуры с использованием красителей специфичных к биогенным соединениям, таким, например, как молекула ДНК и мембранные молекулярные комплексы.

Важнейшей проблемой, которую предстоит решить при подготовке приборно-аналитического блока, является отработка функционирования всех его элементов в экстремальных условиях венерианских облаков и, прежде всего, при очень низких pH.

Существуют также менее специфичные биомаркеры, которые возможно обнаружить на большом расстоянии как признак активности биологических форм, если нет оснований говорить об их абиогенном происхождении. К таким биомаркерам на Марсе относили

метан, биогенное происхождение которого в настоящий момент тем не менее оспаривается. В отношении Венеры большим резонансом было открытие группой английских и американских ученых⁴ газа фосфина (PH_3) в ее облачном слое, который было предложено считать соединением биологического происхождения. Предполагалось, что фосфин накапливается в облаках Венеры благодаря жизнедеятельности гипотетической микробной системы и остается в стабильном состоянии в отсутствии кислорода. Впоследствии это открытие было подвергнуто критике из-за некорректного анализа данных и существования их альтернативного объяснения, не связанного с присутствием фосфина. Авторы также признали спорный характер их открытия, и поэтому вопрос присутствия фосфина в облачном слое Венеры в настоящее время открыт.

Однако сам по себе фосфин уже рассматривался как возможный биомаркер в астробиологических исследованиях. Этот газ в следовых количествах уже достаточно давно обнаруживался в различных экосистемах на Земле и считается, что его образование сопутствует анаэробным биологическим процессам деградации органического вещества. Тем не менее его биологическое происхождение до настоящего времени не доказано окончательно: не описаны ни метаболический путь его образования, ни микроорганизмы, способные к продукции PH_3 . Таким образом, основной аргумент гипотезы биогенного образования фосфина в облаках Венеры, если его присутствие там будет все же подтверждено, должен быть прежде всего получен при исследовании микробных процессов на Земле.

⁴ Greaves J.S., Richards A.M.S., Bains W. et al. Phosphine gas in the cloud decks of Venus. *Nat Astron* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1174-4>

Термодинамические расчеты показывают, что осуществление процесса образования фосфина из фосфата, широко распространенного в биологических процессах соединения, энергетически невыгодно. Авторы гипотезы признания фосфина в качестве биомаркера решили данную проблему в концепции двухстадийного процесса, в течение которого фосфат (PO_4^{3-}) сначала восстанавливается в фосфит (PO_3^{3-}) с участием восстановленного никотинамидадениндинуклеотида (NADH), одного из ключевых переносчиков электронов в метаболических процессах живых организмов, и далее фосфит восстанавливается в фосфин.

Важным условием эффективного существования такой гипотетической системы указывается различие физико-химических условий для первой и второй фазы процесса. Предполагается, что первая фаза процесса должна проходить при умеренных температурах и слабокислом pH, а вторая – при высокой температуре и сильно-кислом pH. Существование условий для первой фазы процесса характерно для земных экосистем, а второй – для системы венерианских облаков. В совокупности такая двухфазная система представляется весьма экзотической. В дополнение, в случае признания фосфина индикатором биологических процессов для условий венерианских облаков, необходимо четко доказать, что этот газ не имеет никаких источников абиогенного происхождения. Все это ставит под сомнение однозначность выводов о фосфине как о явном биомаркере, но одновременно побуждает ученых к активным исследованиям роли фосфина в биологических процессах в земных экосистемах. В любом случае окончательный ответ на вопрос о жизни на Венере могут дать лишь прямые измерения в ее облачном слое.

ГИПОТЕЗЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЖИЗНИ НА ВЕНЕРЕ

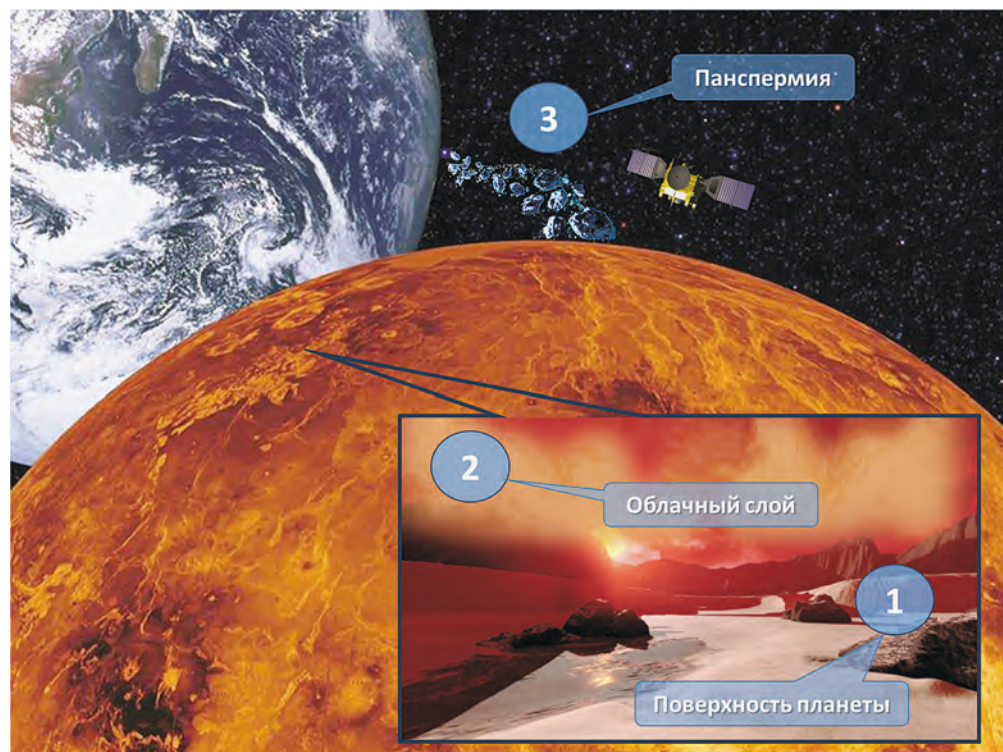
Существуют три основные гипотезы возможного возникновения жизни в облаках Венеры (рис. 5). Первая предполагает появление и развитие жизни на поверхности древней Венеры в начальный период ее существования подобно Земле. Если допустить, что в то время на этой планете существовала вода в жидком состоянии (по некоторым данным, такой период мог продолжаться первые 2 млрд лет), то условия для жизни были вполне благоприятными. Впоследствии изменение климата и сильнейший парниковый эффект привели к тому, что вода полностью

испарилась с поверхности Венеры, а существовавшие в ней организмы смогли адаптироваться к жизни в ее облачном слое. Существует также возможность того, что жизнь в этом случае могла сохраниться под поверхностью Венеры на глубине, где температурные условия становятся более благоприятными и предполагается наличие достаточного количества воды.

По второй гипотезе, стабильные условия в облаках, наличие воды и постоянный обмен веществом с поверхностью могли способствовать зарождению жизни в этой системе независимо от поверхности планеты.

И наконец, третья гипотеза рассматривает возможность переноса земных организмов к Венере в результате бал-

Рис. 5. Гипотезы происхождения жизни в облачном слое Венеры. 1. Зарождение жизни на поверхности древней Венеры с последующей адаптацией к условиям существования в ее облаках. 2. Зарождение жизни в самих облаках. 3. Перенос микробиоты с Земли в результате баллистической или техногенной панспермии



листической (межпланетной) панспермии – посредством кусков земной породы или пылевых частиц различного размера, выброшенных в космическое пространство в результате природных катаклизмов или ударного воздействия метеоритов⁵. В многочисленных экспериментах уже показана способность различных земных микроорганизмов выживать в условиях жесткого излучения и чрезвычайно низких температур, а в случае их нахождения в каком-либо матриксе, представляющим собой частицы земных пород или почвенных систем, их выживаемость многократно увеличивается. Наконец, многие микроорганизмы способны образовывать покоящиеся формы в виде спор или цист в неблагоприятных условиях. Все это в совокупности, как предполагают ученые, может обеспечить выживание микроорганизмов в течение миллионов лет во время их путешествия в космическом пространстве. Причем гипотеза баллистической панспермии может также рассматриваться в отношении переноса земных микроорганизмов на древнюю поверхность Венеры, когда условия на ней были благоприятны для развития организмов земного типа.

Наконец, перенос микробных клеток к Венере мог быть осуществлен космическими аппаратами (техногенная панспермия) многочисленных миссий к Венере в прошлом. До сих пор не существует 100%-й вероятности того, что после их тщательной стерилизации в земных условиях они не несут с собой какие-либо выжившие земные формы жизни.

В любом случае конечный этап гипотезы переноса микробиоты на Венеру предполагает адаптацию микроорганизмов к местным условиям и в случае с облачным слоем – к его экстремальным физико-химическим условиям.

⁵ Joseph R.G. (2019) Life on Venus and the interplanetary transfer of biota from Earth. *Astrophys Space Sci.* 364: 191. <https://doi.org/10.1007/s10509-019-3678-x>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, концепция в области астробиологии по отношению к Венере заключается в существовании гипотетической обитаемой зоны, расположенной в ее облачном слое. Эта обитаемая зона простирается вокруг всей планеты, но она достаточно узкая по ширине и окружена весьма агрессивной средой, непригодной для жизни организмов земного типа.

Такая гипотеза аэрогеохимического способа существования живых организмов вносит важный вклад в современное определение «обитаемой зоны»⁶. Она должна быть ограничена не только диапазоном орбит вокруг центральной звезды, в пределах которого поверхность какой-либо планеты имеет подходящие физико-химические условия для жизни, но также может включать некоторые экосистемы и в за пределами вышеупомянутой зоны, где могут существовать условия для поддержания воды в жидком состоянии, не связанные напрямую с энергией, доступной от звезды. Это могут быть и подповерхностные водные системы, как, например, эндогидросферы спутников внешних планет, и обитаемые зоны в атмосфере, как в случае с Венерой. В основе функционирования таких гипотетических систем должна лежать хемолитотрофия – самый древний тип метаболизма, который позволяет живым существам использовать энергию неорганических соединений и CO₂, в случае его доступности, в качестве единственного источника углерода.

Моделирование такой системы в попытке понять закономерности ее функционирования возможно с помощью экспериментов с земными микроорганизмами – аналогами, которые обла-

⁶ Подробнее о концепции «обитаемой зоны» можно узнать, например, в статье Ананьева В.И., Тавров А.В., Петрова Е.В., Кораблев О.И. Зоны обитаемости. От Солнечной системы к экзопланетам, *ЗиВ*, № 3, 2020

дают способностью выживать и развиваться в экстремальных экосистемах, сходных по параметрам с системой венерианского облачного слоя, восстанавливая и/или окисляя различные соединения серы и железа. Такие соединения серы, как элементарная сера (S^0), сульфид (S^{2-}), сульфат (SO_4^{2-}), сульфит (SO_3^{2-}) и тиосульфат ($S_2O_3^{2-}$), активно используются земными микроорганизмами, осуществляющими серо-зависимый метаболизм. Фототрофные организмы также могут использовать элементарную серу для сочетания ее окисления с аноксигенным фототрофным восстановлением CO_2 для получения энергии.

Важным условием протекания всех предполагаемых реакций является их термодинамическая осуществимость. Высокая кислотность и температура могут благоприятствовать одним реакциям и тормозить другие. В дополнение, из-за уникального набора физико-химических параметров системы венерианских облаков, которая не имеет прямых земных аналогов, астробиологи могут столкнуться с необычной биохимией и метаболизмом гипотетических венерианских микробов, основной стратегией выживания которых является полиэкстремофилия. Эволюция в такой среде может потенциально привести к появлению микробных форм, проявляющих комбинацию свойств, обнаруженных у земных экстремофилов, которой нет ни в одном отдельно взятом известном земном организме. На Венере комплексные механизмы реакции на стресс могут быть важной особенностью живых организмов. Наконец, спецификой такой микробной системы может быть тесная связь биогенных и абиогенных циклов элементов, включая различные поверхностные процессы, такие как шторма, конвекция и вулканическая активность, которые могут быть источниками различных соединений. При проведении лабораторных экспериментов будет также важно разработать метод аэрозолизации изучаемых микроорганизмов, чтобы должным образом смоделировать воздушную среду венериан-

ских облаков и изучить специфические особенности таких микроэкосистем.

Таким образом, гипотетическая микробная система облачного слоя Венеры должна функционировать в условиях ограниченных источников энергии и экстремальных параметров окружающей среды, поддерживать не слишком высокую, но достаточно стабильную биомассу и быть тесно связанной с абиогенными геохимическими процессами в своем окружении для наиболее эффективного получения энергии. Такой образ жизни, очевидно, был характерен для экосистем древней Земли и находится на границе биологии и геохимии.

Модельные земные организмы могут помочь в определении специфических биомаркеров, которые нужно будет искать в первую очередь при исследовании Венеры в космических миссиях. К таким биомаркерам могут относиться специфические вещества – протекторы, помогающие организмам сопротивляться стрессовым факторам окружающей среды, вещества, способствующие повышению гидрофильности клеток и комплексные соединения, характерные при взаимодействии микроорганизмов с неорганическими частицами вещества, а также вещества – индикаторы метаболической активности. Для получения таких данных космические зонды должны быть оснащены высокочувствительной аналитической и микроскопической аппаратурой. Идентификация соответствующих биомаркеров и разработка методов их надежного обнаружения должны стать основными целями астробиологических миссий на Венеру.

Однако независимо от результата такой миссии, знания, полученные в модельных экспериментах на Земле и при разработке соответствующего приборного обеспечения для астробиологических экспериментов в рамках космических программ, дадут представление о системе венерианских облаков и послужат стимулом для дальнейшей экспериментальной и теоретической работы по поиску жизни в различных внеземных экосистемах.

ДОСТИЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ АСТРОМЕТРИИ

ЦВЕТКОВ Александр Станиславович,

кандидат физико-математических наук, доцент,

Санкт-Петербургский государственный университет

DOI: 10.7868/50044394821030038



Астрометрия – самая древняя часть астрономии – основа астрономических наблюдений и измерений координат и времени. Главной задачей астрометрии является реализация системы отсчета – той самой инерциальной системы отсчета, о которой говорится в первом законе Ньютона. Лучшей на сегодняшний день реализацией системы отсчета на практике являются звездные каталоги, которые астрономы создавали для этой цели еще со времен античности. Работа над уточнением данных в каталогах привела к открытию прецессии и нутации земной оси, собственных движений и параллаксов звезд, орбитального движения двойных звезд. Наблюдения в радио- и оптическом диапазоне очень далеких объектов – квазаров – привели к созданию самой точной современной системы отсчета International Celestial Reference Frame (ICRF). Именно к ним привязывается система GPS или ГЛОНАСС в навигаторах. XXI век с его вычислительными возможностями привел к созданию звездных каталогов невиданной мощности, содержащих свыше миллиарда объектов. Но основной прорыв, даже революцию, в астрометрии совершили космические наблюдения. Уже два космических аппарата создали звездные каталоги, точность которых фантастична и позволяет прикоснуться к решению таких задач, сама постановка которых была ранее немыслима. Обзору успехов астрометрии за последние два тысячелетия, массовым звездным каталогам и космическим астрометрическим проектам посвящена эта статья.

Если звезды заносят в каталоги,
Значит – это кому-то нужно!

ЗАДАЧИ АСТРОМЕТРИИ И ИСТОРИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Астрометрия – самая древняя часть астрономии. Ее основной метод – позиционные измерения, т. е. измерение

точных направлений на объекты, в первую очередь этими объектами являлись звезды. Еще с античных времен результаты таких наблюдений оформлялись в виде звездных каталогов. Наиболее известен из древних каталогов (не сохранившийся до наших дней)



Рис. 1. Атлант Фарнезем (Википедия, Интернет)

каталог древнегреческого астронома Гиппарха (II в. до н.э.). В 2005 г. было сделано предположение, что звездный каталог Гиппарха, датированный 129 г. до н.э., присутствует на римской статуе, именуемой Атлантом Фарнезе.

Надо сказать, что каталог Гиппарха был далеко не первым, так как известно, что, сравнив положения звезд в своем каталоге с положением звезд в более ранних каталогах, Гиппарх открыл такое явление, как прецессию, природу которого смог объяснить лишь Исаак Ньютон в 1686 г.

Основной вопрос: зачем нужны звездные каталоги вообще? Следует сказать, что астрономические каталоги бывают разными. Есть каталоги туманностей, галактик, переменных звезд, и т.п. Назовем их астрофизическими.

Но нас будут интересовать астрометрические каталоги. Какие данные обычно содержатся в них? Приведем их в табл. 1.

Положения и собственные движения – точные координаты и скорости их изменения нужны для построения системы отсчета на небесной сфере. Существует абстрактное понятие, которое в английском языке называется Reference System (система отсчета) – теоретическое построение, и конкретное – Reference Frame (к сожалению, переводится также: система отсчета) – реализация системы отсчета на практике [5]. Так вот, наиболее точным воплощением абстрактной инерциальной системы отсчета как раз и являются звездные каталоги. Именно к ним происходит привязка координат различных объектов на небесной сфере, и в конечном итоге и на Земле. Всем известная система GPS/ГЛОНАСС – привязана через космические аппараты к каталогу квазаров – сверхдалеких объектов, собственными движениями которых можно пренебречь.

Собственные движения звезд (proper motions) – скорости изменения координат звезд. Их знание позволяет перевести координаты звезд на другую эпоху как вперед, так и назад. Анализ самих собственных движений позволяет изучать кинематику звезд как окосолнечного пространства, так и Галактики в целом. Открытие собственных движений принадлежит знаменитому английскому астроному Эдмунду Галлею, обнаружившему в 1718 г., что некоторые яркие звезды из каталога Гиппарха–Птолемея заметно изменили свои положения среди других звезд [1].

Крайне сложно и драматично решался вопрос о расстояниях до звезд. Попытки обнаружить параллактические смещения звезд, вызванные обращением Земли вокруг Солнца, велись еще в античности. Их отсутствие (конечно

Данные астрометрических каталогов

Данные	Комментарий
Положения (координаты)	Всегда присутствуют, могут быть в экваториальной и/или галактической и даже эклиптической («Альмагест» Птолемея) системе координат. Приводятся на конкретную эпоху наблюдений.
Собственные движения	Изменения координат со временем. Практически всегда присутствуют в современных звездных каталогах.
Параллаксы	Расстояния до звезд. Присутствуют в специальных каталогах и в каталогах космической астрометрии.
Звездные величины	Блеск звезд в одной или в нескольких общепринятых шкалах. Хотя это величина и астрофизическая, но почти всегда наличествует.
Информация о кратности	Часто приводится, указывая на наличие особенностей в астрометрических данных.
Номера звезд по другим каталогам	Полезная информация, позволяющая объединять и сравнивать данные различных каталогов.
Дополнительная информация	Различные данные, обычно астрофизического характера, как правило, полученные из других каталогов. Например, лучевые скорости – скорости звезды вдоль луча зрения, полученные по спектральным измерениям.

же, вызванное чрезвычайной малостью эффекта) было одним из аргументов против гелиоцентрической системы мира. Поиском параллаксов в Новое время занимались такие видные ученые, как Тихо Браге, Галилео Галилей, Роберт Гук. В ходе поисков параллаксов Джеймс Бредли обнаружил в 1728 г. аберрацию света и нутацию земной оси, а Уильям Гершель в 1804 г. – орбитальное движение у двойных звезд [3].

Лишь в 1837 г. В.Я. Струве в Дерптской обсерватории, а 1838 г. Фридрих Бессель в Кёнигсбергской обсерватории и Томас Хендерсон (обсерватория Мыса Доброй Надежды) провели первые достоверные оценки параллаксов ближайших звезд, которые составили лишь доли секунды дуги [4]. Так, параллакс Альтаира оказался равен у Струве $0.181'' \pm 0.094''$. Для более наглядного представления малости

измеряемых углов можно воспользоваться табл. 2.

Определение тригонометрических параллаксов (т. е. расстояний до звезд, полученных геометрическим методом) посредством наземных наблюдений – крайне трудоемкое занятие. Искажения, вносимые Земной атмосферой,

Таблица 2

Расстояния и углы, под которыми будет видна рублевая монета диаметром 2 см

Расстояние	Угол
4 км	1"
40 км	0.1" – параллаксы ближайших звезд
4000 км (Москва – Лиссабон)	0.001" или 1 мсд (mas) – точность Hipparcos
400 000 (Земля – Луна)	0.01 мсд – точность Gaia

ставят предел при наблюдении малых углов. Точность одного измерения, даже в условиях высокогорья и идеального астроклимата, не превосходит 0.1–0.2". Предельно достижимые статистические точности наземных наблюдений в большинстве своем ограничены значением 0.05", что даст ошибку в определении параллакса в 100% уже на расстоянии 20 пк. Все это привело к тому, что с 1838 по 1991 г. с приемлемой точностью были измерены параллаксы сотен звезд. Не следует путать тригонометрический параллакс звезд с так называемыми фотометрическими, спектральными параллаксами. Под последними подразумевают косвенные оценки расстояний до звезд по их астрофизическим характеристикам. Но для того чтобы это можно было сделать, необходимо определить «истинным» тригонометрическим способом расстояния до звезд определенных типов. В дальнейшем эта информация может быть использована для вычисления расстояния до звезд, тригонометрический параллакс которых недостижим для измерений.

ЭПОХА НАЗЕМНЫХ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Последним каталогом дотелескопической эпохи следует считать каталог одного из лучших наблюдателей Тихо Браге, который создавался в 1570–1600 гг. [6]. Точность положений этого каталога составляет около одной минуты дуги, что является пределом для невооруженного глаза. Именно этот каталог, точнее координаты планет в системе этого каталога, позволили Иоганну Кеплеру вывести свои знаменитые законы, которые в конечном итоге привели к открытию закона всемирного тяготения Исааком Ньютоном.

XVIII–XIX вв. характеризуются постепенным увеличением точности наблюдений, которая к середине XX в. достигла порядка 0.1". Последний каталог знаменитой серии FK (The Catalogues of Fundamental Stars) FK5 содержал всего 1535 звезд, положения и собственные движения которых были уже на пределе точности наземных наблюдений, а история наблюдений его звезд насчитывала более столетия. Каталоги этой серии (FK3, FK4, FK5) многие десятилетия задавали фундаментальную систему координат. Методика наблюдений была построена таким образом, что координаты каждой звезды в них определялись индивидуально, независимо друг от друга. Этим и вызвано столь небольшое число звезд в фундаментальных каталогах.

Для распространения фундаментальных систем на большее число звезд использовались фотографические каталоги, такие как PPM (Position and Proper Motions), содержащий около 400 тыс. звезд, но со значительно меньшей точностью. Такие каталоги назывались относительными. Ошибки определения фундаментальной системы проникали в каталоги-распространители.

Бурно развивающаяся астрофизика требовала от астрометрии, прежде всего, высокоточных расстояний. В астрофизике известен фотометрический метод определения расстояний, использующий зависимость «период–светимость» для переменных звезд-цефеид. Однако для калибровки этой шкалы необходимо промерить расстояние до нескольких цефеид прямым тригонометрическим методом. Ближайшая же к нам цефеида – Полярная звезда – расстояние до нее, по данным космической астрометрии, составляет 137 пк. Измерение параллакса Полярной с поверхности Земли может быть произведено на грани возможного. Остальные цефеиды находятся еще дальше. Определение

расстояний до ближайших галактик основано на шкале цефеид, дальнейшие косвенные методы позволяют определить расстояния до далеких скоплений галактик и в финале определить значение постоянной Хаббла и возраст Вселенной. Но для их уверенного определения следует откалибровать зависимость «период–светимость» прямым методом. Этого наземная астрометрия сделать уже не могла.

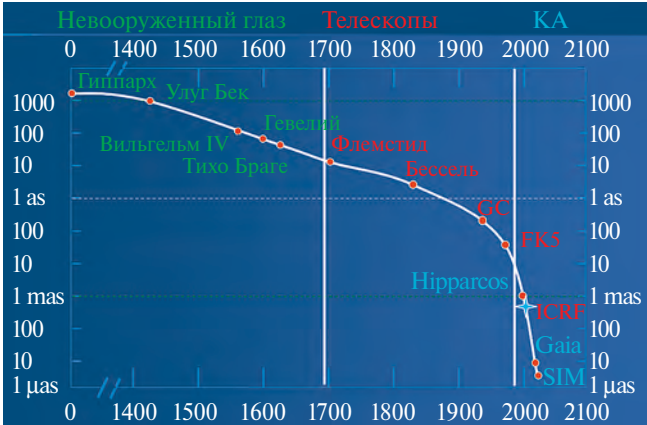


Рис. 2. Динамика точности астрономических наблюдений

РАДИОАСТРОМЕТРИЯ

Параллельно с оптическими наблюдениями развивалась радиоастрономия, которая с появлением радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (сокращенно РСДБ, или VLBI в англ.) привела к резкому увеличению точности наблюдений вплоть до 0.001" [2].

В простейшем случае радиоинтерферометр – это система из двух радиотелескопов, ведущих синхронные наблюдения одного и того же точечного радиоисточника. Этот прибор измеряет временную задержку прихода фронта волны радиоизлучения на один телескоп по сравнению с другим. При небольших базах радиотелескопы возможно соединить непосредственно линиями связи. Но если телескопы расположены на расстояниях нескольких тысяч километров друг от друга, а порою и на разных материках, то необходимо использовать точные стандарты времени, задаваемые атомными часами. Анализ измерения задержек позволяет получить географические координаты радиотелескопов, небесные координаты наблюдаемых радиоисточников, а также тонкие эффекты во вращении

Земли – движение полюсов в ее теле и неравномерность вращения. Точность этих измерений определяется длиной базы интерферометра, то есть расстоянием между телескопами и длиной волны принимаемого радиоизлучения. В 1970–90-х годах во всем мире развернулись работы по созданию радиоинтерферометрических сетей, с помощью которых удалось достичь точности позиционных наблюдений квазаров порядка 0.001–0.0005 секунды дуги [9]. В нашей стране такие работы ведутся в рамках проекта КВАЗАР, для осуществления которого в Санкт-Петербурге был создан Институт Прикладной Астрономии Российской Академии Наук. В действующую сеть входят радиоастрономические обсерватории «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары», и Центр управления, сбора и обработки данных [8]. Все это позволило создать систему отсчета принципиально нового типа – теперь вместо звезд стали использоваться в основном квазары, координаты которых были получены на миллисекундном уровне точности.

Как известно, квазары – это космологические объекты, удаленные от нас на предельные расстояния. Даже



Рис. 3. Радиотелескоп сети «Квazar» в Бадарах (Википедия, Интернет)

если предположить нереально высокие скорости их поперечного движения, сопоставимые со скоростью света, то и в этом случае мы не заметим их собственных движений на современном уровне точности. Таким образом, квазары образуют как бы «сферу неподвижных звезд», которую можно использовать в качестве системы отсчета. Однако не все квазары подходят для ее построения. Некоторые квазары имеют переменную структуру, вызванную физическими процессами внутри них, что приводит к смещению центра радиоизображения. Поэтому для построения системы отсчета было выбрано 667 спокойных радиоисточников, из них 212 с ошибкой определения положения всего 0.0004 секунды дуги. Новая, радиоастрометрическая система отсчета позволила на новом уровне изучать явления, происходящие на Земле:

особенности ее вращения, движение материков, тектонику плит.

Однако радиосистема имеет существенный недостаток – недоступность ее в оптике. И если для системы GPS/ГЛОНАСС это не имеет особого значения, то для оптических наблюдений это создает существенные проблемы. Этот недостаток удалось преодолеть только методами космической астрометрии, т. е. проведениями астрометрических измерений в оптическом диапазоне в космосе.

ПЕРВЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АСТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ HIPPARCOS

В 1989 г. Европейское Космическое Агентство (ESA) осуществило запуск космического аппарата HIPPARCOS

(High Precision PARallax Collecting Satellite – «спутник для сбора высокоточных параллаксов») с целью получения положений, собственных движений и параллаксов звезд на миллисекундном уровне точности. Космический аппарат проработал на орбите 37 месяцев, в течение которых он выполнял астрометрические и фотометрические измерения звезд по заданной программе.

Обработка этих наблюдений привела к созданию двух каталогов: Hipparcos, содержащего информацию о 118 218 звездах с точностью определения положений, годичных собственных движений и параллаксов на уровне 1 mas (milli arc second, в русском переводе – мсд – миллисекунда дуги) и каталога Tycho, содержащего уже свыше 1 млн звезд, с точностью измерения тех же параметров до 25 mas [10].

Положения и собственные движения звезд в каталогах Hipparcos и Tycho приводятся в фундаментальной системе ICRS (International Celestial Reference System), как раз реализованной с помощью каталога внегалактических радиоисточников, получившего название ICRF (International Celestial Reference Frame). Вследствие того, что внегалактические источники (квазары) были недоступны прямому наблюдению на аппарате Hipparcos (за исключением 3C273), пришлось использовать несколько прямых и косвенных методов, чтобы связать предварительную систему каталога Hipparcos с ICRF.

Появление Hipparcos вызвало «бум» статей самой разной направленности. Перечислим кратко лишь некоторые основные результаты:

1. Разработка самой технологии космических астрометрических наблюдений. Связывание космической системы отсчета с наземной. Создание программных продуктов, использующих данные Hipparcos и Tycho, обеспечение

доступа астрономической общественности к результатам космической миссии.

2. Калибровка диаграммы Герцшпрунга–Рессела. Калибровка светимости переменных звезд разных типов (цефеиды, мириды). Определение абсолютных звездных величин. Измерение масс компонентов двойных звезд.

3. Исследование кинематики звезд окосолнечного пространства. Изучение структуры звездных ассоциаций. Поиск движущихся скоплений. Распределение темной материи в Галактике.

4. Калибровка шкалы межгалактических расстояний. Определение абсолютных возрастов шаровых звездных скоплений.

Следует отметить, что, прежде всего, успех миссии Hipparcos связан с определением тригонометрических расстояний 100 тыс. звезд на уровне 1 мсд, что дает точность в 20% до расстояний в 200 пк, и 50% – до расстояний 400 пк. Однако для объектов, находящихся на расстоянии 1 кпк и далее, точность Hipparcos недостаточна.

Собственным движениям, полученным на аппарате, оказалась свойственная особенность, которая не проявляется при наземных наблюдениях. При определении собственного движения звезды традиционными методами разность эпох составляет обычно не менее 30 лет, а то и больше. Относительно низкая точность наземных наблюдений компенсируется большой разностью эпох. В Hipparcos же разность эпох составляет всего 3 года, можно сказать, что собственные движения звезд, полученные на таком кратком сроке, – «мгновенные». Довольно часто звезда имеет невидимый (или не регистрируемый на аппарате) спутник. Из-за обращения компонентов вокруг общего центра тяжести могут возникнуть различия собственного движения звезды, определенного наземным способом (голубая стрелка на рис. 4), по сравне-

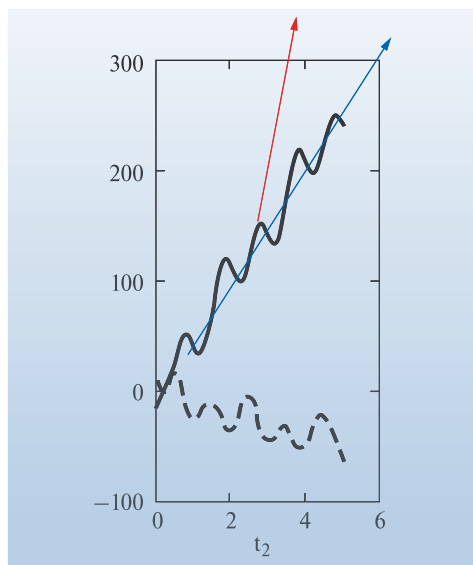


Рис. 4. «Мгновенные» собственные движения звезд

нию с космическим (красная стрелка). Сравнение собственных движений наземных каталогов с данными космических каталогов может помочь в поисках звезд с темными спутниками.

На аппарате Hipparcos наблюдалось около 1 млн звезд по небольшому числу раз (2–3 наблюдения за весь период). Эти наблюдения легли в основу каталога Tycho. Но надежность данных первого каталога Tycho сразу же вызвала нарекания. По одному разу аппарат Hipparcos пронаблюдал около 3 млн объектов. Это обстоятельство подтолкнуло астрометристов к замечательной идее, приведшей к созданию Tycho-2 – каталога нового поколения. Новизна этого каталога определяется тем, что для вывода собственных движений звезд в качестве первых эпох были использованы обширные ряды наземных астрометрических наблюдений, а для вторых эпох – весь массив данных, собранный космическим аппаратом Hipparcos. В результате появился астрометрический каталог Tycho-2, содержащий положения и собственные движения с точностью около 2.5 мсд/год, а также двухполосную фотометрию 2.5 миллионов звезд (рис. 5). Каталог почти полный до звездной величины 11.5^m [11].

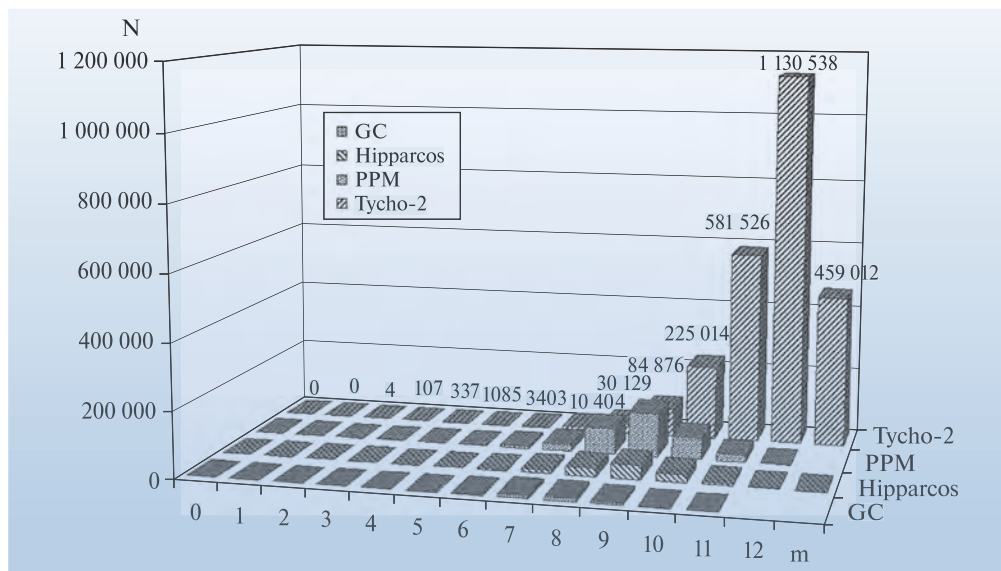


Рис. 5. Сравнение числа звезд каталогов GC, Hipparcos, PPM и Tycho-2

Этот каталог сыграл большую роль в различных кинематических исследованиях и являлся лучшим по точности собственных движений звезд вплоть до появления релизов каталога Gaia.

МАССОВЫЕ АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ КАТАЛОГИ НАЧАЛА XXI ВЕКА

Если изначально точность положений звезд в Hipparcos составляла около 1 мсд на 1991 г., то за прошедшие уже 30 лет из-за ошибок в собственных движениях порядка 1 мсд/год точность каталога деградировала до 30 мсд. Вследствие этого необходимы были новые наблюдения и новые каталоги. Повсеместное внедрение компьютерных методов обработки, сопоставление разных наблюдательных каталогов привело в начале XXI века к появлению массовых звездных каталогов немислимого ранее объемов, содержащих около 1 млрд записей. Поскольку эти каталоги в своей массовости предвещают появление космического каталога такой же мощности, мы считаем необходимым познакомить с ними читателя.

Первым массовым каталогом можно считать **NOMAD** (The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset), ставшим доступным астрономической обществу в 2004 г. благодаря усилиям Военно-морской обсерватории США. Каталог содержит свыше 1 млрд объектов. Каталог занимает около 100 Г, хранится в 1800 отдельных файлах, а формат каждой величины (координаты, собственные движения, звездные величины) – бинарный целочисленный, что обеспечивает высокую скорость его считывания. Тем не менее даже простейшая обработка такого каталога целиком занимает пару часов на современном персональном компьютере. Если вам необходимо решать такие задачи разово, то это терпимо, а при постоянной работе с данными такого объема следует подумать о системе распределенных вычислений. Сверхвысокая плотность звезд в таких каталогах позволяет ставить и решать задачи, которые ранее были немислимы. Например, можно исследовать структуру всей Галактики в обширных областях, а не в околосолнечном пространстве. На рис. 6 показано распределение звезд каталога NOMAD

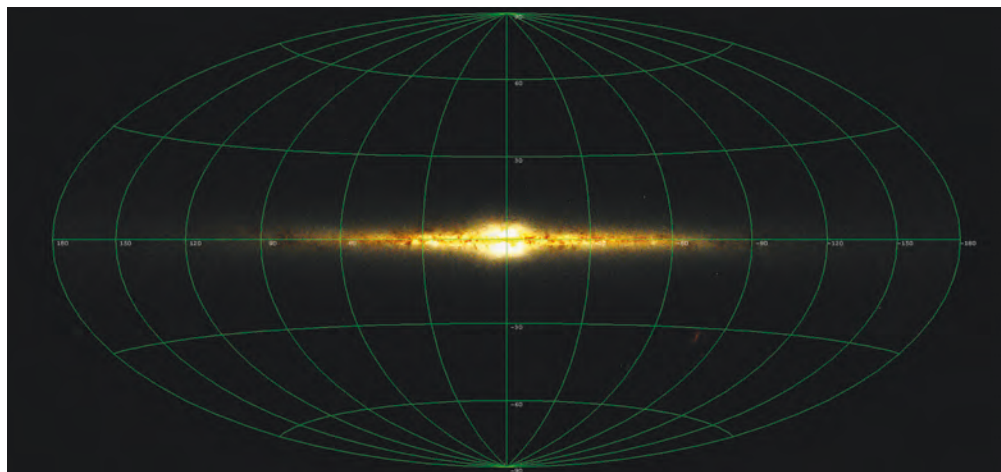


Рис. 6. Звезды каталога NOMAD в проекции Хаммер–Айтоффа, визуализация инфракрасных звездных величин в видимом диапазоне

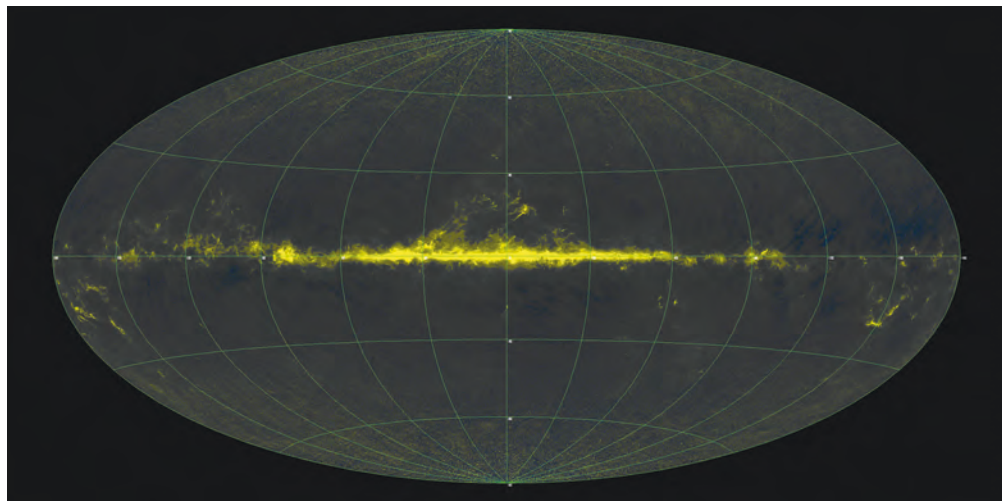


Рис. 7. Средний показатель цвета (J-K) звезды каталога NOMAD. Желтый цвет соответствует большому значению, голубой – меньшему

по небесной сфере в проекции Айтоффа. Цвет звезд подобран искусственно, путем сопоставления инфракрасным звездным величинам H, J, Ks цветовых компонент RGB-модели. Это изображение вызывает иллюзию, что мы рассматриваем нашу Галактику откуда-то со стороны. На самом деле, это

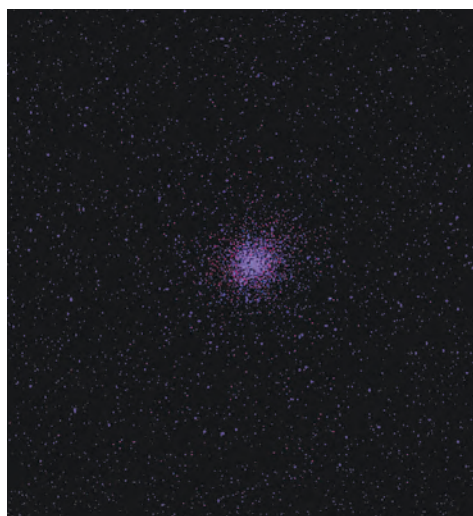


Рис. 8. Окрестности звездного скопления M13, полученные по данным NOMAD

вид Млечного пути на небесной сфере в ИК-диапазоне. И это не фотография, а компьютерное изображение, где каждая точка соответствует записи в каталоге.

Высокая плотность звезд позволяет исследовать распределение пылевой материи. Нанесем на карту не сами звезды, а лишь средний показатель цвета всех звезд, попадающих в конкретный пиксель изображения, а это десятки тысяч и более звезд (рис. 7). Полученное изображение отчетливо показывает «покраснение» цвета, вызванного распределением в основном пылевой материи.

Наконец, с помощью каталогов такой мощности можно исследовать и небольшие области, но очень подробно. На рис. 8 показаны окрестности шарового звездного скопления M13 по данным каталога NOMAD. Еще раз обращаем внимание читателя, что это не фотография, а построенное компьютерным способом изображение.

При всех достоинствах каталога, лишь 340 млн звезд (!) имеют данные о собственных движениях, и их точности очень не однородны. Поэтому сей-

час используют массовые каталоги следующего поколения. Они немного меньше NOMAD, но значительно более точные.

Каталог **UCAC4** содержит 113 млн звезд от 8 до 16 звездной величины. Ошибки собственных движений звезд составляют от 1 до 10 мсд/год. Каталог содержит фотометрические данные из проекта **2MASS** – инфракрасного наземного каталога 437 млн объектов, содержащего положения и звездные величины в трех полосах H, J, Ks, но не имеющего данных о собственных движениях звезд.

Каталог **PPMXL** – самый массовый – содержит около 900 млн звезд. Точность собственных движений оценивается от 4 до 10 мсд/год. Однако практическая работа с этими данными показала, что фактическая точность в несколько раз ниже. Каталог содержит фотометрические данные в 6-ти полосах: двух видимых и четырех инфракрасных, но не для всех звезд есть все данные.

Оба эти каталога основаны большей частью на данных Военно-морской обсерватории США (USNO), а также используют данные свыше 140 других звездных каталогов.

Каталог **XPM**, созданный в Харьковской обсерватории, построен путем объединения данных 2MASS и наблюдательного каталога USNO-A2.0, что позволило получить положения и собственные движения для 314 миллионов звезд в диапазоне звездных величин от 10^m до 20^m . Алгоритм вычисления собственных движений построен так, что они «абсолютизированы» относительно галактик (которые находятся на таких расстояниях, что на сегодняшнем уровне точности их собственные движения незаметны). Это позволил сделать каталог 2MASS, который, помимо звезд,

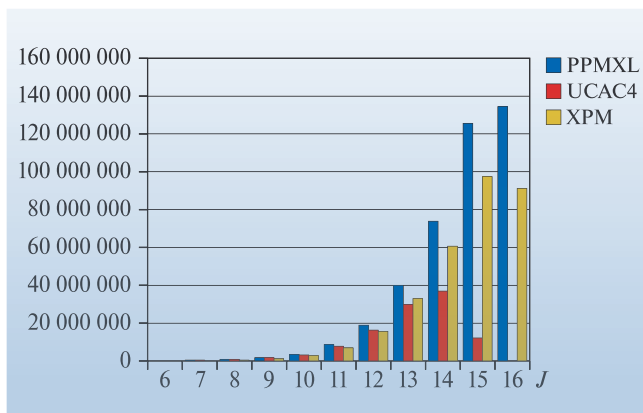


Рис. 9. Распределение звезд массовых звездных каталогов по звездной величине J (только те звезды, у которых есть эти фотометрические данные)

содержит еще положения около 1 млн так называемых протяженных объектов, большая часть из которых – галактики.

КОСМИЧЕСКАЯ МИССИЯ GAIA

Космический аппарат

Уже на первом обсуждении результатов миссии Hipparcos было принято решение о следующей. Планировалось несколько вариантов, но финансовую поддержку получил проект Gaia – Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, разработанный Европейским Космическим Агентством (ESA Gaia Science Community). Аппарат был запущен 19 декабря 2013 г. и до сих пор работает на орбите. Стоимость всего проекта, включая обработку данных, приближается к 1 млрд евро.

Принципиально аппарат похож на Hipparcos. Так же как и он, Gaia измеряет дуги (угловые расстояния) между объектами. Оптическая схема Gaia состоит из двух зеркальных телескопов с размером основных зеркал (M1, M1) примерно полтора на полметра (рис. 10). С помощью

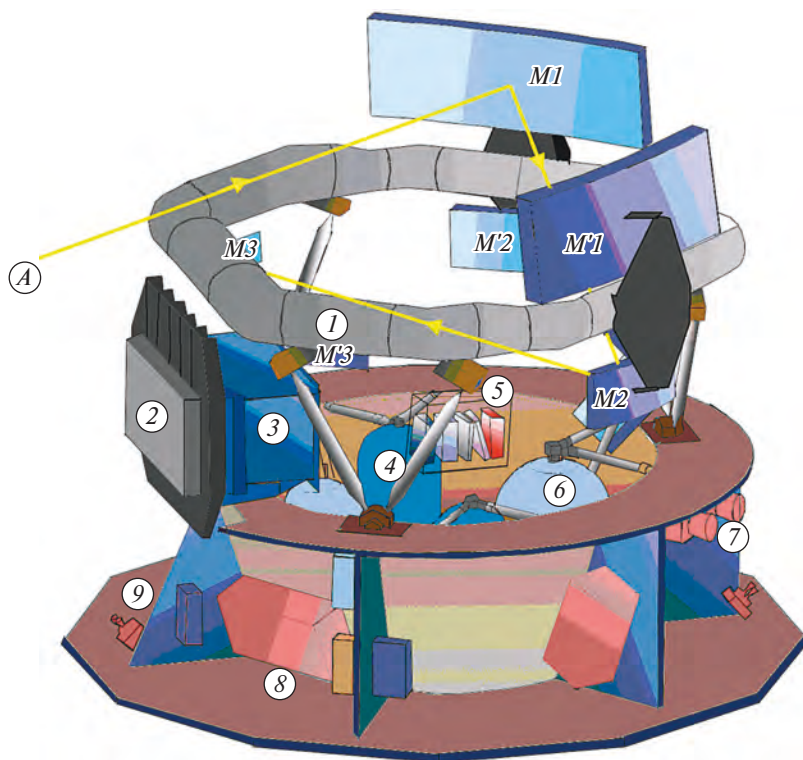


Рис. 10. Схема телескопа Gaia. M1, M2, M3 – зеркала первого телескопа, M'1, M'2, M'3 – зеркала второго телескопа, 1 – система крепления зеркал, 2 – система охлаждения сенсоров, 3 – сборка в фокальной плоскости, 4 – баллон с азотом, 5 – дифракционные решетки спектрографа, 6 – топливный бак, 7 – звездный датчик, 8 – электроника и батареи, 9 – главная энергетическая установка (ESA Gaia)

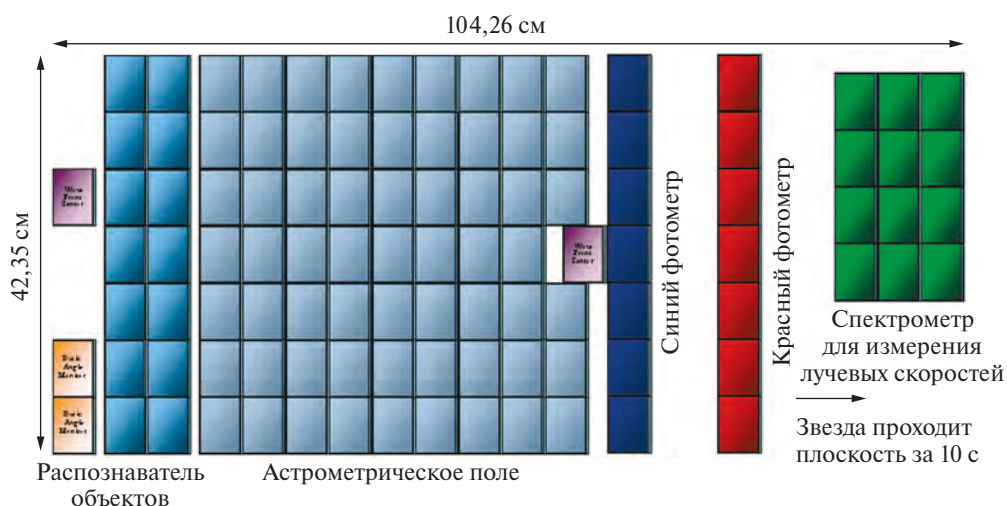


Рис. 11. Мозаика ПЗС-матриц в фокальной плоскости телескопа (ESA Gaia)

вспомогательных зеркал оба телескопа проецируют изображение в одну фокальную плоскость, а разделение изображений возложено на цифровую обработку. Идентификация и классификация объектов происходит прямо на борту аппарата. В фокальной плоскости размещена, по-видимому, самая большая в мире ПЗС-матрица (точнее мозаика из матриц) (рис. 11).

Космический аппарат находится в точке Лагранжа L2 таким образом, чтобы он никогда не попадал в тень Земли (рис. 12). Аппарат никогда не отдаляется от точки L2 на расстояние свыше 1 км, для обеспечения заданной точности наблюдений его координаты должны быть известны с точностью около 150 м, а скорость – с точностью до 1 мм/с (рис. 13). В течение 6.5 лет аппарат, медленно вращаясь и прецессируя, сканирует небесную сферу таким образом, чтобы в среднем каждый объект наблюдался не менее 70 раз за весь период наблюдений (рис. 14). Это даст возможность определить координаты объекта с точностью 10 микросекунд дуги (мксд) и собственные движения с точностью 10 мксд/год. Следует понимать, что Gaia – сканирующий аппарат, поэтому невозможно навести

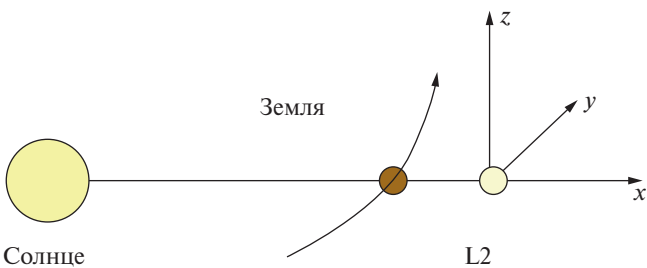


Рис. 12. Местонахождение аппарата – точка L2 (ESA Gaia)

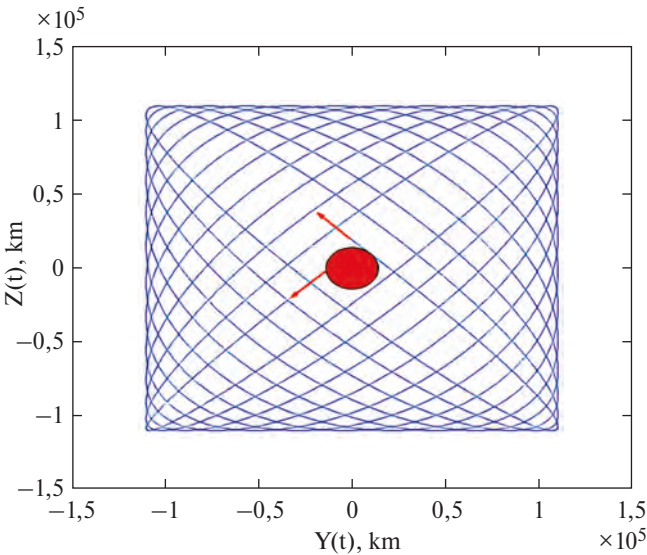


Рис. 13. Орбита аппарата относительно точки Лагранжа L2 (ESA Gaia)

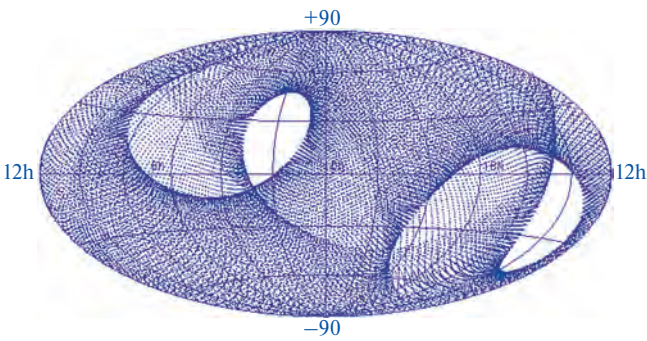


Рис. 14. Сканирование небесной сферы за интервал 100 дней (ESA Gaia)

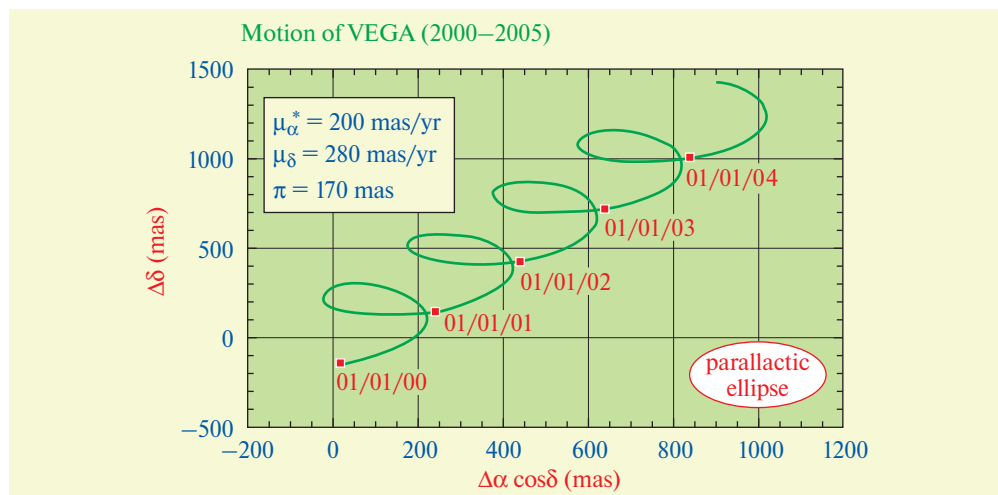


Рис. 15. Пример траектории звезды

на конкретный объект и невозможно изменить план наблюдений.

Помимо астрометрических данных, аппарат Gaia сразу проводит грубую спектральную классификацию с помощью двухполосного фотометра (в диапазонах 330–680 и 640–1050 нм), а также более тонкий спектральный анализ для определения лучевых скоростей (что в принципе не было реализовано на Hipparcos) и параметров звездных атмосфер. Фотометры также позволяют построить кривые блеска переменных звезд.

После произведения вычислений для каждой звезды будет получена ее траектория на небесной сфере. Пример такой траектории приведен на рис. 15. В нем отчетливо виден параллактический эллипс, а его смещение за несколько лет позволяет оценить собственное движение звезды.

ПРОЕКТ GAIA В ЧИСЛАХ

Финальная версия каталога будет содержать свыше 1 млрд объектов (предварительные результаты уже показали,

что даже 1.6 млрд). Из них 10^6 звезд, ярче 12^m , будут иметь точность определения положений около 4 мксд (0.004 мсд). $30 \cdot 10^6$ звезд, ярче 15^m – точность 10 мксд, все звезды слабее, но ярче 20^m – точность не менее 150 мксд.

Плотность покрытия будет составлять от 25 тыс. звезд до 3 млн звезд на квадратный градус вблизи галактического экватора.

Будут определены лучевые скорости 200 млн звезд (но на сегодняшний момент – только 7 млн). Точность лучевых скоростей ярких звезд ($V < 15^m$) ожидается на уровне 1–2 км/с, более слабых – 5–10 км/с.

Будет произведен анализ переменности порядка 100 млн звезд, определены массы около 10 тыс. звезд и обнаружены экзопланеты на расстояниях до 200 пк. В Солнечной системе будут произведены наблюдения 500 тыс. малых планет. А на космологических расстояниях ожидается открытие (!) 500 тыс. новых квазаров.

Проект Gaia представляет собой сложнейшую вычислительную задачу. На полную обработку всех данных потребуются выполнить до 10^{21} инструкций

с плавающей точкой. Для сравнения можно сказать, что в год запуска Gaia все компьютеры мира выполняли 10^{25} таких операций в год! Кстати, один из самых больших вычислительных проектов в мире тоже астрономический – это поиск внеземных искусственных сигналов в радионаблюдениях с помощью распределенных вычислений – программа SETI [7]. Если бы потребовалось затратить всего 1 с времени на обработку одного объекта, то нам пришлось бы ждать 30 лет до выхода финального каталога.

Для решения этих сложных вычислительных задач на аппарате установлен компьютер, «сжимающий» сырые данные и передающий их на Землю со скоростью 3–8 Мбит/с, которые, в свою очередь, обрабатываются в специально построенном для этого вычислительном центре в г. Мадрид. Полный объем переданных с космического аппарата «сырых» данных оценивается в 250 Тбит, распакованные данные займут 150 Тбайт, а рабочие копии, архивы, тесты – 1 Пбайт.

Общая теория относительности в Gaia

Для достижения точности на уровне уже в доли мсд требуется применять релятивистские небесно-механические модели и модели распространения света. Использование ньютоновской модели приведет к ошибкам в астрометрических данных. Релятивистская модель наблюдения включает:

1. Моделирование релятивистской аберрации (Прети и де Феличе, 2010).
2. Учет релятивистских эффектов в движении спутника вплоть до поправок уровня 0.6 мм/с!
3. Релятивистские эффекты в распространении света. Учет монополярного гравитационного поля всех больших планет и некоторых их спутников. Учет квадрупольного поля планет-гигантов

(т. е. учет несферичности гравитационных полей!). Влияние движения тел.

4. Релятивистские эффекты в движении малых тел Солнечной системы.

5. Релятивистские эффекты в движении звезд (эффект Рёмера, микролинзирование).

Долгое время Общая теория относительности оставалась дисциплиной скорее теоретической, либо использовавшейся при описании экстремальных объектов (нейтронных звезд, черных дыр). Но высокоточные наблюдения перевели Общую теорию относительности в разряд практических дисциплин. Без учета релятивистских эффектов точности в микросекунды дуги не достижимы. Следует сказать, что релятивистская модель распространения света в Солнечной системе использовалась уже при обработке данных Hipparcos.

Научные задачи Gaia

Миссия Gaia исследует широкий спектр научных задач. Краткое их перечисление уже составит внушительный список:

1. Картирование Галактики.
2. Физика звезд (классификация, светимость, эффективные температуры, индекс металличности).
3. Кинематика и динамика Галактики.
4. Калибровка шкалы космических расстояний.
5. Уточнение возраста Вселенной.
6. Распределение темной материи в Галактике (микролинзирование, наблюдения «коричневых» карликов).
7. Построение фундаментальной системы отсчета, связь радио- и оптической систем через прямое наблюдение квазаров.
8. Проверка Общей теории относительности.
9. Уточнение модели Солнечной системы.

Особо следует остановиться на задаче калибровки шкалы расстояний. Как

уже обсуждалось в начале статьи, расстояние – самый сложный для наблюдения параметр. Метод оценки расстояний до галактик и в конечном счете масштаб всей Вселенной определяются тем, насколько точно мы знаем расстояние до цефеид, насколько надежна полученная зависимость «период–светимость». Для калибровки шкалы расстояний будут выполнены следующие исследования:

1. Параллаксы до цефеид, находящихся ближе 3 кпк, будут известны с точностью лучше 1%. С точностью не хуже 4% будут промерены расстояния до всех цефеид в Галактике.
2. Параллаксы для переменных типа RR Лун, находящиеся ближе 3 кпк, также будут промерены с точностью 1%. Остальные звезды этого типа будут иметь ошибку параллакса, не превосходящую 10%.
3. Параллаксы мирид (долгопериодические переменные) в Галактике будут иметь относительную ошибку не более 6%.
4. Параллаксы индивидуальных звезд в 20-ти шаровых звездных скоплениях

будут измерены с точностью 10%, а средние расстояния до всех шаровых скоплений будут на уровне 1%.

5. Аппарат Gaia «достанет» даже до Магеллановых облаков. Параллаксы цефеид в нем будут известны с точностью 30%. Можно будет ответить на вопрос: «одинакова ли зависимость период–светимость для цефеид в нашей Галактике и в других галактиках».

Предварительные результаты миссии

В 2016 г. был выпущен так называемый первый релиз каталога Gaia – Gaia DR1. Он содержал 1 140 622 719 звезд, для которых были приведены только координаты, и особое подмножество TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution, 2 057 050 звезд точностью около 0.3 мсд), являющееся комбинацией каталогов Hipparcos, Tycho-2 и данных Gaia.

25 апреля 2018 г. увидел свет второй релиз – Gaia DR2. Он содержит уже значительный объем данных, полученных исключительно на космическом аппарате (табл. 3). Однако использовать

Таблица 3

Сравнение релизов каталога Gaia

	DR3	DR2	DR1
Общее количество источников	1 811 709 771	1 692 919 135	1 142 679 769
Количество источников с 5 параметрами	585 416 709	1 331 909 727	2 057 050
Количество источников с 2 параметрами	343 964 953	361 009 408	1 140 622 719
Источники со средней величиной G	1 806 254 432	1 692 919 135	1 142 679 769
Источники со средней G_{BP} фотометрией	1 542 033 472	1 381 964 755	–
Источники со средней G_{RP} фотометрией	1 554 997 939	1 383 551 713	–
Источники с лучевыми скоростями	7 209 831	7 224 631	–
Переменные источники	из DR2	550 737	3194
Известные астероиды с данными эпохи	из DR2	14 099	–
Эффективные температуры (T_{eff})	из DR2	161 497 595	–
Источники с радиусом и светимостью	из DR2	76 956 778	–

индивидуальные параллаксы пока следует с большой осторожностью. У большого числа звезд параллакс даже отрицательный! На рис. 16 представлено распределение параллаксов полумиллиона квазаров (он должен быть нулевым), но, как мы видим, разброс параллакса для этих объектов составляет ± 5 мсд. В силу этого, непосредственно построение диаграммы Герцшпрунга–Рессела дает весьма размытую картину (левая часть рис. 17), а если воспользоваться усредненными данными о расстоя-

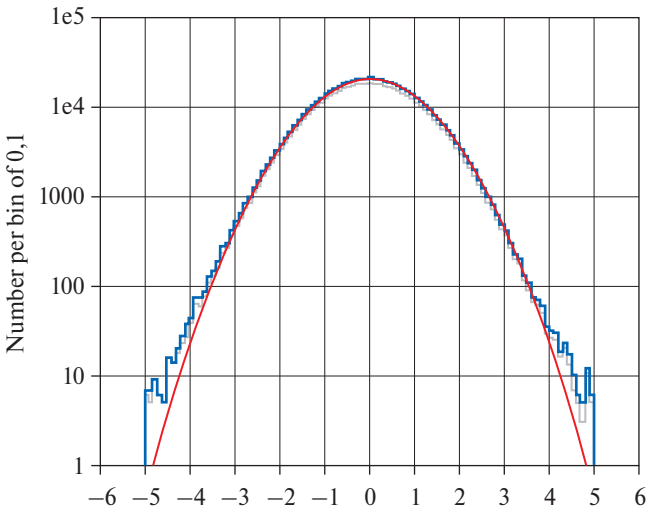


Рис. 16. Распределение параллаксов 556 849 квазаров по данным Gaia DR2 (ESA Gaia)

нии для звезд, принадлежащих рассеян- ным скоплениям, то картина становит- ся более четкой (правая часть рис. 17). На этих диаграммах впервые использо- ван показатель цвета $G_{BP}-G_{RP}$ из раз- ности звездных величин, определенных на аппарате, а не из наземных источников. В декабре 2020 г. вышел третий релиз каталога (Gaia Early Data Re- lease 3). В нем около 1.8 млрд звезд, имеющих все 5 астрометрических па-

раметров (координаты, собственные движения и параллакс), вплоть до звезд 21^m . Для такого же количества звезд будет представлена улучшенная двуполосная фотометрия, при этом утверждается, что фотометрическая система DR3 будет отличаться от DR2. Выход первой финальной версии (будут и последующие), в которой бу- дут полностью реализованы заявлен- ные точности, намечен на 2022 год.

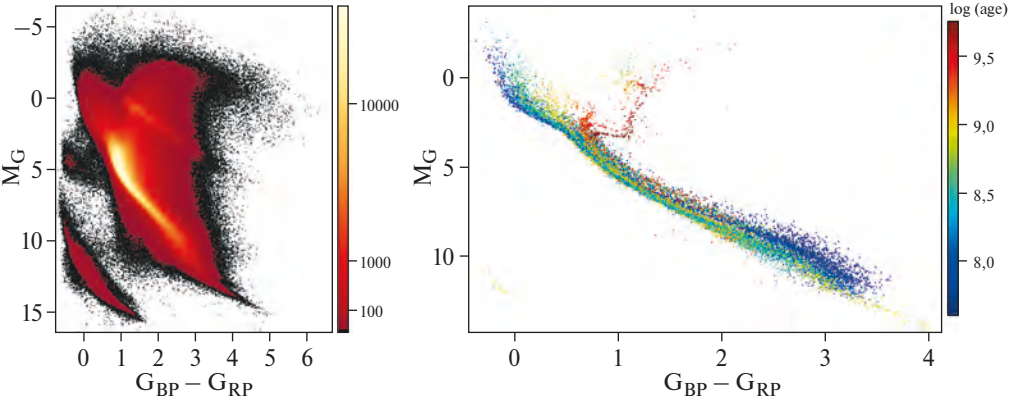


Рис. 17. Диаграммы Герцшпрунга–Рессела для всех звезд и для 32 рассеянных звездных скоплений, по данным Gaia DR2 (ESA Gaia)

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-11-00001.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-11-00001.

Литература

1. Киселев А.А. Собственные движения «неподвижных» звезд и их значение в астрономии. Соросовский образовательный журнал. 2002.
2. Витязев В.В. Успехи астрометрии. Журнал «Планетарий» (Общество «Знание» России. 1999. № 22).
3. Ковалевский Ж. Современная астрометрия. Фрязино: Век 2, 2004.
4. Соколовская З.К. Первые определения звездных параллаксов. К вопросу о приоритете одного открытия. Вестник АН СССР. 1972. № 3.
5. Витязев В.В. и др. Небесные и земные координаты. Учебное пособие по астрометрической практике. Изд. СПбГУ, 2011.
6. Володаров В.П. Добросовестный наблюдатель. Вестник РАН. М., 1996. Т. 6, № 12.
7. Гиндилис Л.М. SETI в России: последнее десятилетие XX века, Земля и Вселенная. 2000. № 5. С. 39–48; № 6. С. 64–72.
8. Матвеев Л.И. История РСДБ – становление и развитие. СПб.: Институт прикладной астрономии, 2007.
9. Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Радиointерферометрия со сверхдлинными базами. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Под ред. Л.И. Матвеев. М.: Мир, 1989.
10. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos: Учебно-метод. пособие. СПб., 2005.
11. Цветков А.С. Руководство по работе с каталогом Tycho-2: учебно-метод. пособие. СПб., 2005.



**А вы отправили
обязательный
экземпляр?**

Издательство «Наука» предлагает организациям и независимым издателям услугу по отправке Обязательного Электронного Экземпляра в Российскую государственную библиотеку и Российскую книжную палату

При размещении научных, научно-популярных книг и журналов в Электронной библиотечной системе Издательства «Наука» (libnauka.ru) данную услугу мы предоставляем бесплатно. Задать вопрос и узнать о стоимости услуги вы можете по адресу ees@naukaran.com

Реклама

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru



Капанадзе А.Л.

**Опытным путем:
Эксперименты, изменившие мир.**

М.: Наука, 2019. – 319 с.

В книге рассказывается об основных вехах в развитии экспериментальных методов в самых разных областях наук о природе, человеке и обществе – физике, химии, астрономии, биологии, физиологии, медицине, археологии, социологии, психологии, экономике. Охвачен период с античных времен до наших дней. Читатель узнает о знаменитых и малоизвестных опытах, оказавших огромное влияние на формирование наших представлений о мире и о нас самих. Большое внимание автор уделяет не только истории приборов и технологий, но и истории идей. Затрагиваются проблемы отличия классического эксперимента от наблюдения (когда опыт «ставит» сама природа), преемственности технических инноваций, влияния общественного климата на работу экспериментатора, роли случайности в этой работе.

Для широкого круга читателей.



Образцов П.А.

Высокие широты.

М.: Наука, 2018. – 192 с. – (Научно-популярная литература)

Книга повествует об открытии и освоении Арктики и Антарктики, этих двух полюсов холода и мужества, об отважных героях, благодаря которым человечество узнало о природе, животном мире самых северных и самых южных земель, а также о том, какая непростая и вместе с тем увлекательная жизнь идет сегодня в этих суровых, таинственных и манящих краях.

Для широкого круга читателей.



Верещагин Г.В., Аксенов А.Г.

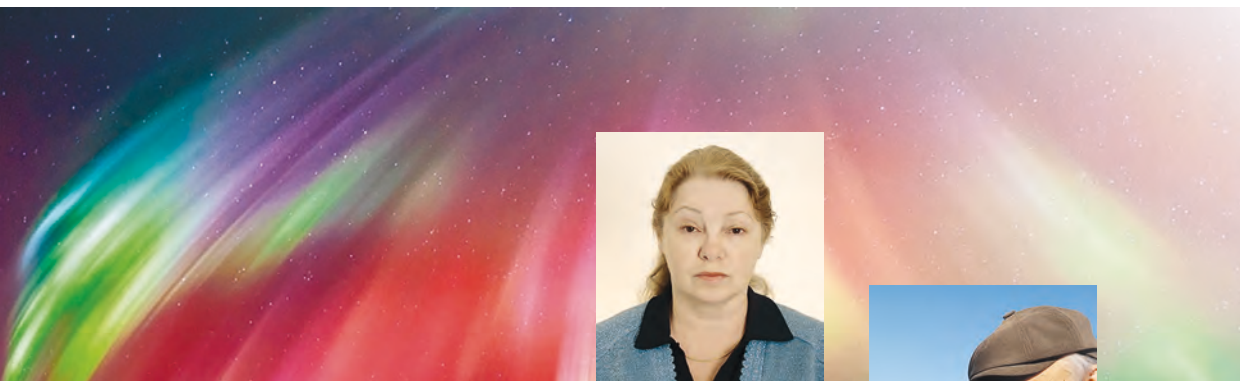
Релятивистская кинетическая теория с приложениями в астрофизике и космологии.

М.: Наука, 2018. — 471 с.

Релятивистская кинетика широко применяется в астрофизике и космологии. В последние годы интерес к этой теории вырос, поскольку появилась возможность ставить эксперименты при таких условиях, где релятивистские эффекты становятся существенными. Настоящая монография состоит из трех частей. В первой части представлены основные идеи и концепции, уравнения и методы теории, включая вывод кинетических уравнений из релятивистской цепочки Боголюбова, а также соотношение кинетического и гидродинамического описаний. Вторая часть — это введение в вычислительную физику, причем особое внимание уделяется численному интегрированию уравнений Больцмана и смежным вопросам, а также многокомпонентной гидродинамике. В третьей части дан обзор приложений, который охватывает вопросы ковариантной теории отклика, термализации плазмы, комптонизации в статических и динамических средах, кинетики самогравитирующих систем, образования структуры в космологии и излучения нейтрино при гравитационном коллапсе.

Для студентов старших курсов университетов, аспирантов и исследователей, специализирующихся в области теоретической физики, астрофизики и космологии.

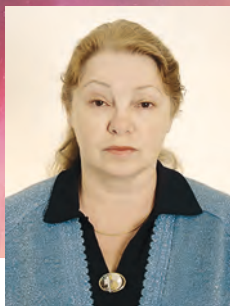
СОЛНЕЧНАЯ И ЗВЕЗДНАЯ АКТИВНОСТЬ В ОЖИДАНИИ СЮРПРИЗОВ



КАЦОВА Мария Михайловна,

доктор физико-математических наук

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М. В. Ломоносова



СОКОЛОВ Дмитрий Дмитриевич,

профессор, доктор физико-математических наук

Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН



DOI: 10.7868/50044394821030026

...Один считает звёзды в тёмном небе,
Другой единства видит глубину,
Один на солнце пятна вдруг заметит,
Другой откроет сердце всё ему...

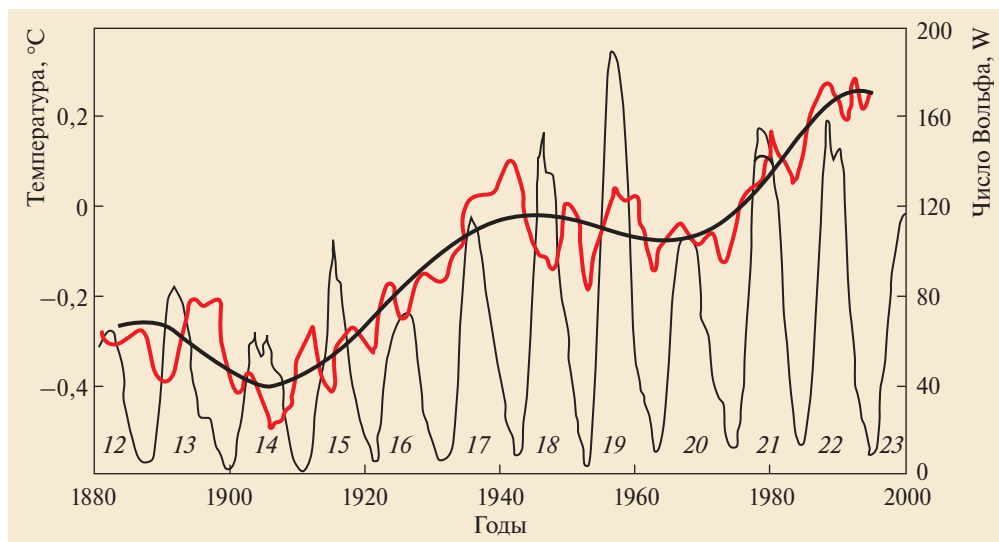
Саша Чёрный

Солнце – огромный магнит. Его магнитное поле меняет свою полярность на противоположную приблизительно раз в одиннадцать лет в ходе знаменитого одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Конечно, подобные циклы звездной магнитной активности есть и на ряде других звезд. Исследуя магнитную активность звезд, астрономы лучше понимают активность Солнца, а также находят разнообразные отличия от солнечной активности.

ПОЧЕМУ ВАЖНО ИЗУЧАТЬ ЗВЕЗДНУЮ АКТИВНОСТЬ?

Солнце – одна из многих звезд, которые можно наблюдать на небе. Для нас эта звезда особенно интересна просто

потому, что мы живем вблизи от Солнца, и наша жизнь прямо зависит от того, что происходит на нем. Может быть, это не совсем приятно для нашего самолюбия, но Солнце – рядовая звезда среди многих триллионов других звезд. Если бы не наша близость к ней, изуче-



Изменение температуры на Земле в 1880–2000 гг. в зависимости от появления пятен на Солнце (числа Вольфа – W). Красным цветом показаны среднегодовые значения, толстая кривая – сглаженные значения. Цифры на графике – номера циклов солнечной активности. Из статьи Обридо В.Н. Циклы солнечной активности и особенности 23-го цикла. *ЗиВ*, 2011, № 1

ние нашего светила не вызвало бы такого пристального внимания гипотетических астрономов, живущих на некоторой планете, обращающейся вокруг какой-то иной звезды. Однако для нас изучение Солнца – не просто интересная научная задача.

Полвека назад люди молчаливо предполагали, что свойства Солнца, климат на Земле и другие подобные характеристики – это важные, но в масштабах, сравнимых со временем жизни современной цивилизации, практически неизменные факторы, на фоне которых происходит развитие человечества¹. Конечно, когда-то давно окончился ледниковый период, вымерли мамонты и окрестности Москвы освободились от ледника. Возможно, что во всех этих важных событиях астрономические факторы и сыграли какую-

то роль, но это интересно только для научной фантастики и чистой науки. Как мы помним, знаменитый Шерлок Холмс теоретически допускал мысль о шарообразности Земли, но полагал, что в практической жизни не стоит отвлекаться на подобные мелочи. Видимо, развивая эту мысль, астрономию исключили на некоторое время из школьной программы.

Теперь люди стали более внимательны к относительно небольшим, но важным изменениям окружающей среды. В этой связи наиболее известна проблема климатических изменений, которая сейчас обсуждается на всех уровнях. Нет сомнений, что нужно бороться с различными и далеко не всегда позитивными воздействиями человека на окружающую среду, но не стоит закрывать глаза на то, что и поведение Солнца тоже не является неизменным на протяжении сравнительно недавней истории. Выяснилось, например,

¹ См.: Ясаманов Н.А. Климат Земли в прошлом и в будущем. *ЗиВ*, 1991, № 1.

что солнечная активность во времена короля Франции Людовика XIV (вторая половина XVII – начало XVIII вв.) была существенно иной, чем сегодня. В это время произошел знаменитый теперь, по крайней мере, Центральной и Восточной Европе, минимум Маундера солнечной активности (отсутствие пятен на Солнце с 1645 до 1715 г.). С ним связывают так называемый малый ледниковый период эпохи средневековья, во время которого жизнь европейцев была достаточно сурова из-за неурожая и эпидемий, но их зимние развлечения вызывают зависть у современных обитателей².

Во времена викингов (в эпоху раннего Средневековья, около 774 г.), видимо, произошла аномально сильная вспышка на Солнце, следы которой фиксируются в данных о радиогенных изотопах. К счастью для окружающих народов, викинги не пользовались (по разным причинам) мобильными телефонами, крылатыми ракетами и системами ГЛОНАСС или GPS, поэтому они не обратили внимания на это событие. Дошедшие до нас свидетельства изотопной геохимии не позволяют точно сказать, что бы произошло, если бы такая же вспышка случилась сегодня. Однако если какое-то явление обошлось без особых последствий в прошлом, то не стоит оставлять без внимания подобные явления сейчас. Хочется верить, что именно поэтому курс астрономии восстановили в наших школах.

² Обридо В.Н. Циклы солнечной активности и особенности 23-го цикла. ЗИВ. 2011, № 1.

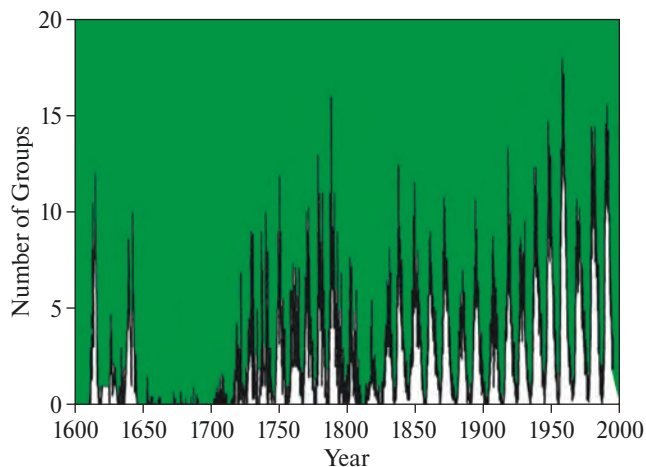


«Зимний пейзаж с конькобежцами близ замка». Картина нидерландского живописца Хендрика Аверкампа, 1609 г. Иллюстрация жизни европейцев позднего средневековья в эпоху минимума Маундера

Конечно, можно надеяться, что изучение звезд поможет нам лучше понять то, что происходит на Солнце, и к чему нужно быть готовым в практической жизни людей. Так, думающий человек после заграничной поездки или изучения иностранного языка начинает лучше понимать свою страну и родной язык.

КАК ИЗУЧАЮТ ЗВЕЗДНУЮ АКТИВНОСТЬ

С точки зрения звездной астрономии, т. е. раздела астрономии, изучающего звезды, солнечная активность и, в частности, 11-летний солнечный цикл – не очень впечатляющее явление. В мире звезд происходят гораздо более масштабные явления – например, вспышки Сверхновых. Подобная вспышка, если бы – не к ночи будет сказано – произо-



Циклическая активность солнца в 1600–2000 гг. См., например, Frick P., Galyagin D., Hoyt D.V., Nesme-Ribes E., Schatten K., Sokoloff D., Zarharov V., *Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups. Astronomy and Astrophysics. V. 328, p. 670–681 (1997)*

шла на Солнце, то жизнь на Земле была бы практически мгновенно уничтожена. К счастью, подобные катастрофы происходят не так часто, не близко и не на звездах, похожих на Солнце. Поэтому, говоря о солнечно-звездных аналогиях, нужно, прежде всего, выделить те явления, которые имеет смысл сравнивать с активностью Солнца.

Конечно, переменные звезды известны очень давно, и астрономы с удовольствием изучают их на протяжении столетий. Кстати говоря, отечественная наука выглядит вполне успешно в контексте этих исследований: созданный и издаваемый в знаменитом ГАИШ МГУ каталог переменных звезд пользуется всемирной известностью в кругах специалистов³.

Известно много причин, по которым звезда может быть переменной.

³ См.: Самусь Н.Н. Переменные звезды: куда мы идем и чем может помочь любитель астрономии. *ЗиВ*, 2014, № 4.

При этом далеко не все из них интересны для сопоставления с солнечной активностью. Например, звезда может быть членом двойной системы и время от времени затмеваться другим членом такой системы. Такие звезды называются затменно-переменными. Их изучение очень важно и интересно, но прямо не помогает понять активность Солнца.

Итак, вырисовывается задача – выявлять среди переменных звезд те, активность которых интересно сопоставлять с солнечной и выяснять черты этой активности. Сразу же видны две проблемы, которые придется решать на этом пути. Во-первых, Солнце несравненно ближе к нам, чем остальные звезды, поэтому мы можем изучать его активность гораздо более детально, чем активность других звезд. Во-вторых, Солнце одно, и люди так или иначе изучают его уже очень давно: еще древние летописцы замечали солнечные пятна и рассказывали об этом в своих летописях. Звезд слишком много. Люди тоже давно интересовались ими: в китайских летописях упоминаются несколько случаев экстремальных событий на некоторых звездах (например, 4 июля 1054 г. в созвездии Тельца вспышку Сверхновой SN 1054, давшую начало Крабовидной туманности), но в целом мы знаем Солнце несравненно лучше, чем любую другую звезду.

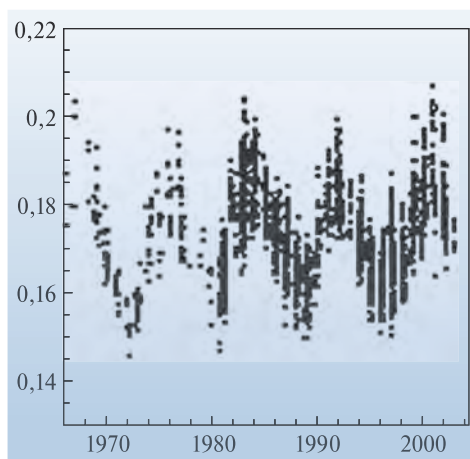
Вторую проблему трудно решить кардинально, но постепенно такие знания накапливаются. Не будем рассказывать обо всех подобных работах, а ограничимся двумя проектами.

Оказывается, что звездную активность можно обнаружить по периоди-

ческим изменениям некоторых спектральных линий. В самом деле, чем больше пятен на поверхности звезды, тем сильнее меняется температура различных частей ее атмосферы, а это влияет на то, какова интенсивность ее спектральных линий. Эта связь не обязательно проста, но ее можно изучить, наблюдая Солнце как звезду, т. е. не различая вклад разных областей ее поверхности, а интересуясь лишь интегральным сигналом. Обнаружив подобные изменения на Солнце, можно поискать их на других звездах и постараться выявить на них что-то, похожее на цикл солнечной активности.

Возможность такого способа изучения звездной активности была обоснована около полувека назад замечательным американским астрономом Олином Вильсоном (O. Wilson). Ему удалось организовать систематическое наблюдение звездной активности в обсерватории Маунт Вильсон, т. е. на горе имени Вильсона, расположенной к северо-западу от Лос-Анджелеса в Калифорнии (США). Совпадение названий и имени случайное, но знаменательное.

Дальше дело за малым. Нужно десятилетия аккуратно вести наблюдения по единой программе. По опыту Солнца мы знаем, что один цикл активности составляет около 22 лет: два одиннадцатилетних цикла составляют один физический цикл подобно тому, как два колебания синусоиды с разными знаками составляют один ее период⁴. Чтобы быть уверенным в своих выводах, неплохо пронаблюдать хотя бы два цикла. Стоит сопоставить получающееся таким образом число с длиной человеческой жизни, чтобы прийти к печальному выводу: выполнение подобной задачи в эпоху «грантовой»

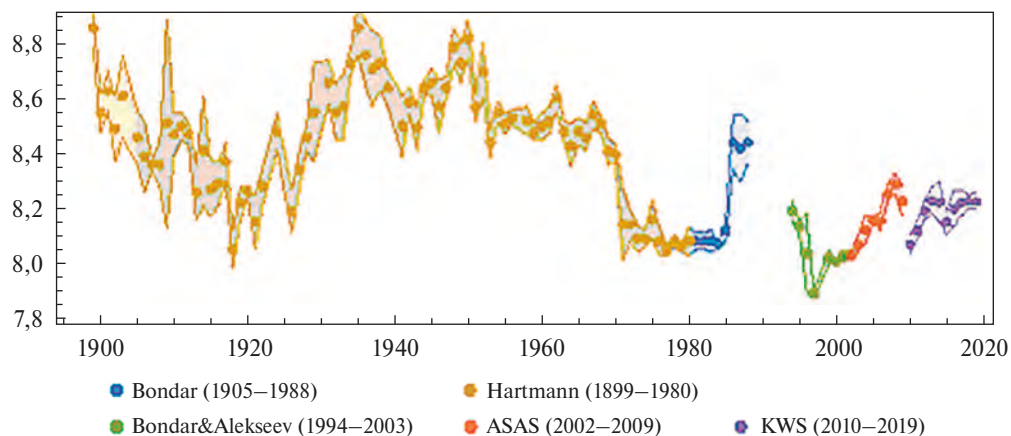


Циклическая активность звезды спектрального класса G HD 81809 с 1966 по 2004 г. Считается, что примерно такое будущее ожидает Солнце, когда оно будет старше и вращаться значительно медленнее, чем сейчас. По данным H-K проекта. F. Favata et al. 2008

науки мучительно трудно. Первый раз ты пишешь заявку на проект, и тебе, возможно, дают деньги на целых три года. Ты пишешь новую заявку, и деньги тебе дают, но гораздо менее охотно и тоже на три года. Наконец, ты пишешь заявку на продолжение проекта еще раз, и тебе говорят, не можешь ли ты перестать пережевывать старую тематику, — а ты только подходишь к первым предварительным выводам...

Тем не менее американским астрономам удалось решить эту трудную научно-организационную задачу. За столь длительный период сменилось несколько поколений руководителей проекта, но при публикации итоговых статей имена умерших стоят в одном ряду с именами живущих астрономов. При чтении это производит сильное впечатление. Большую роль в том, что проект увенчался успехом, сыграла астроном из Гарварда Салли Балюнас

⁴ Никольский Г.М. Цикличность солнечной активности. ЗиВ, 1983, № 4.



Изменения активности переменной звезды V833 Тельца, похожей на молодое Солнце, в 1900–2020 гг. По горизонтальной оси – время, по вертикальной оси – видимая звездная величина в области спектра около 5500 Å. По данным Н.И. Бондарь

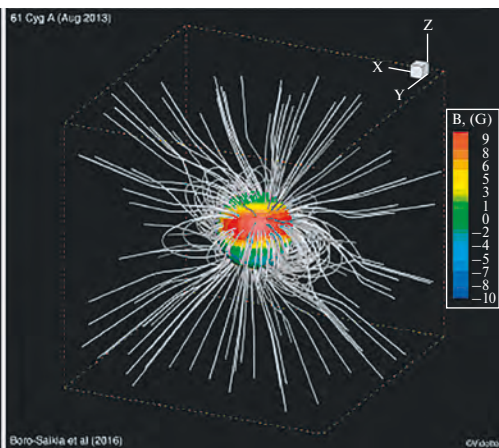
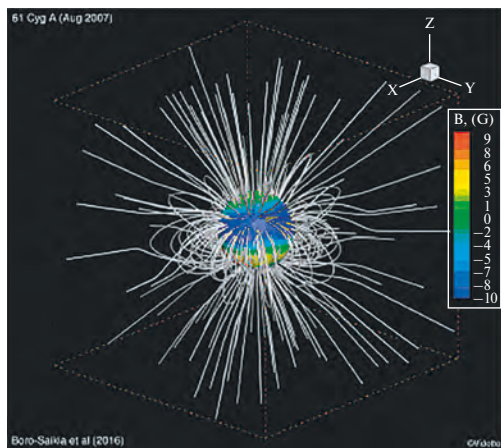
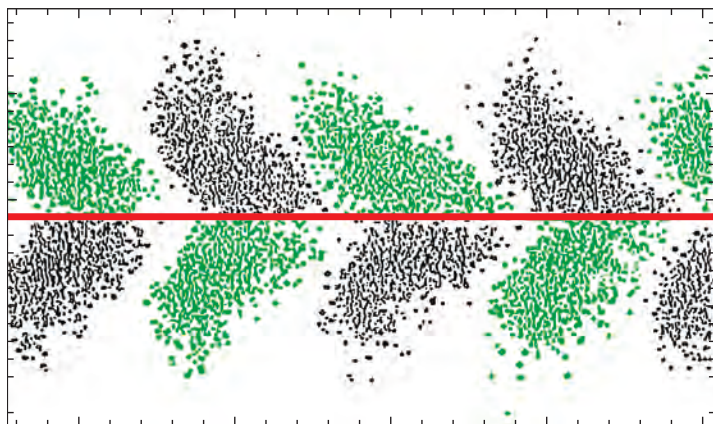
(S. Baliunas). Благодаря наблюдениям, полученным в ходе этого проекта, – по названию спектральных линий он называется Н–К проектом – выяснено, что на многих звездах, похожих на Солнце, действительно есть циклы активности, которые более или менее похожи на солнечные циклы⁵.

Можно было бы сказать – ну конечно, мы так и думали, было бы странно, чтобы Солнце было каким-то исключением! В какой-то мере это действительно так. Однако наука не может оперировать подобными суждениями – даже самые ожидаемые результаты в ней нуждаются в доказательстве. Сходство между циклами активности Солнца и звезд Н–К проекта совсем не полное. В различных деталях Солнце как раз отличается от стандартных звезд этого проекта. Именно эти детали выявляют и описывают астрономы, осмысливающие обширные результаты этого проекта.

Другой, менее масштабный проект, о котором хотелось бы рассказать, связан с изучением звезды, которая по астрономической номенклатуре носит гордое имя V833 Тельца. Для этой звезды астроном Крымской астрофизической обсерватории Н.И. Бондарь собрала данные о переменности излучения, полученные различными наблюдателями на разных обсерваториях более чем за 100 лет. Разумеется, в работах такого рода вклад отдельного человека очень ограничен – к сожалению, жизнь каждого из нас не такая длинная, и в ней должно найтись место многому другому, кроме наблюдений. Собрать воедино результаты наблюдений различных авторов, делать их сопоставимыми и пригодными для дальнейшей обработки – задача весьма трудоемкая, кропотливая и неблагодарная, но Наталия Ивановна с ней справилась⁶.

⁵ Baliunas S.L., Donahue R.A., Soon W.H., Horne J.H., Frazer J., Woodard-Eklund L., Bradford M., Rao L.M., Wilson O.C. et al. 1995. Chromospheric Variations in Main-Sequence Stars. II. *Astrophys. J.* 438, 269.

⁶ Stepanov R., Bondar' N.I., Katsova M.M., Sokoloff D., Frick P. 2020. Wavelet analysis of the long-term activity of V833 Tau, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 495, N 4, p. 3788–3794.



В ходе звездного цикла меняется полярность магнитного поля. Естественно, что эта смена полярности выглядит очень по-разному в зависимости от того, как представляются данные наблюдений. Вверху: обычное представление чередования полярностей в ходе цикла солнечной активности, известное как правило Хейла. По горизонтальной оси – время, по вертикальной оси – широта группы солнечных пятен. Цветом указаны две различные полярности. Приведена обобщенная картина для циклов XX века, поэтому шкала времени не размечена. Внизу: так представляют смену полярности в ходе цикла активности звезды 61 Лебеда А. (A. Vidotto, 2017), длительность цикла около 7 лет

В итоге удалось понять, что активность звезды V833 Тельца во многом отличается от активности Солнца. Если на V833 Тельца и есть цикл, подобный солнечному, то он намного длиннее. Во всяком случае то, что видно за доступное время наблюдений, выглядит как флуктуации, характерные времена которых занимают всю шкалу времен, доступную для анализа.

Естественно ожидать, что природа циклов активности звезд, похожих на Солнце, в общих чертах та же, что и на Солнце. В конечном счете эта активность связана с эффектом электромагнитной индукции. О ней рассказывают в школьном курсе физики, но этот эффект работает очень неожиданно во вращающейся звезде, вещество которой вовлечено в

конвективные движения. Подобный процесс в память об одной из деталей первых автомобилей принято называть динамо.

Когда в нашем распоряжении есть данные не только об активности Солнца, но и о целом наборе звезд, более или менее похожих на Солнце, то удастся проверить важный момент. Чем сильнее крутится «ручка» у динамо-машины звезды, тем сильнее возбуждаемое на ней механизмом динамо магнитное поле. Если же эта «ручка» крутится очень быстро, то в зависимости между вращательным и магнитным моментами наступает насыщение. Это тоже естественная закономерность, но ее было необходимо и очень непросто установить.

Постепенно вырисовываются контуры того класса звезд, для которых можно ожидать активности циклического характера, подобной солнечному циклу. Звезда V833 Тельца, видимо, находится близко к этой границе как сравнительно молодая звезда. Еще один признак, маркирующий эту границу, связан с тем, насколько велика часть звезды, занятая конвекцией. Видимо, для звезд, все вещество которых вовлечено в конвективные движения, динамо работает существенно иначе, чем в Солнце. Свидетельства об этом постоянно накапливают и астрономы-наблюдатели, и специалисты, работающие в области динамо. С одним из авторов данной статьи этими соображениями уже более четверти века назад поделилась спикер парламента Эстонии в 2003–2006 и 2007–2014 гг. (а по совместительству известный астроном) Эне Эргма (E. Ergma) во время прогулки у площади Вогезов в Париже. Отрадно, что проблемы звездной активности продолжают привлекать внимание политических лидеров. Напомним, что

в начале исследований солнечной активности стоял, как известно, король Франции Людовик XIV (1643–1715). Быть может, эту хорошую традицию стоит продолжить.

В этом месте самое время сказать: хорошо, конечно, что астрономы узнали так много о циклической активности звезд, пользуясь всевозможными наблюдениями излучения, приходящего от звезды как целого. Для Солнца-то ведь мы знаем гораздо больше и можем следить за тем, как располагаются солнечные пятна по поверхности нашей звезды (они возникают в местах, где магнитное поле на поверхности Солнца особенно сильное), а потом научились измерять магнитное поле в этих солнечных пятнах⁷. Видимо, на звездах нам это никогда не удастся – ведь звезды видны в телескоп как точки. Кроме Солнца.

Замечательно, что это совсем не так! Уже более 35 лет астрономы могут рисовать карты с пятнами на поверхности звезд, а со временем научились строить и карты распределения магнитного поля по поверхности звезды. Конечно, это удастся не всегда, существуют разнообразные ограничения данного метода. Он получил название метод обратных доплеровских изображений (или зеэман-доплеровских, если речь идет о магнитном поле). Такие ограничения существуют у каждого метода наблюдений, а астрономы постоянно работают над тем, чтобы границы возможного отодвигались дальше и дальше, так что дело в принципе. Пожалуй, еще приятнее, что этот метод в основе своей

⁷ Язев С.А. Комплексы активности на Солнце (солнечные пятна). ЗиВ, 2019, № 2; Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 1985.

разработан отечественными специалистами и представляет собой плод совместной работы московских астрономов и математиков.

Идея метода обратных доплеровских изображений кажется простой. Звезды вращаются вокруг своей оси, поэтому части поверхности, находящиеся на разных широтах, движутся с разными скоростями – расстояния от оси вращения различные. Из-за эффекта Доплера слегка изменяются частоты спектральных линий, которые излучаются данным участком поверхности. Из излучений этих кусочков складывается излучение всей звезды. Теория образования спектральных линий хорошо разработана, поэтому, наблюдая много спектральных линий и сравнивая их форму с предсказаниями теории, можно понять, как должна распределяться температура по поверхности звезды в каждой фазе ее вращения, чтобы получить наблюдаемую картину. Если прибавить к эффекту Доплера еще эффект Зеемана расщепления спектральных линий в магнитном поле, то можно пробовать восстанавливать и распределение магнитного поля.

Идея, может быть, и понятная, но вот ее реализация потребовала развития новой области науки – методов решения некорректно поставленных задач при решении уравнений. Компьютер, – а без его помощи за такие задачи браться бессмысленно, – начинает сомневаться, рисовать ли на карте поверхности звезды большие пятна или систему маленьких пятен, усеивающих всю видимую поверхность звезды. Примерно за двадцать лет до появления метода обратных доплеровских изображений математик, академик А.Н. Тихонов предложил идею того, как можно было бы справляться с этой проблемой. Этот подход так

и вошел в науку как метод регуляризации Тихонова⁸.

Метод обратных доплеровских изображений был его первым эффективным и успешным применением. Работа была выполнена группой специалистов. Астрономическая ее часть принадлежит В.Л. Хохловой, а математическая – А.В. Гончарскому и А.Г. Яголе. Сохранился впечатляющий отчет о том, как Вера Львовна впервые представляла результаты этой работы на крупной международной конференции в 1983 г. Она пересказала примерно то, что написано выше, но в более строгих научных выражениях, и показала необходимые иллюстрации. Слушатели, естественно, с ходу плохо поняли этот рассказ и стали спрашивать, что именно авторы предполагали про расположение пятен на звезде. Эта дискуссия была застенографирована и опубликована. «Да ничего не предполагали, нам это не было нужно», – отвечает Вера Львовна. Видимо, тут до аудитории дошел смысл работы и ее масштаб – в стенограмме написано: «В аудитории установилось долгое и тяжелое молчание».

С тех пор прошло больше 35 лет. Метод обратных доплеровских изображений используется повсеместно. Немного обидно, что это звучное название придумали не сами авторы, а те, кто применял метод. К сожалению, неумение получить все дивиденды с полученных достижений было существенным недостатком отечественной науки. Мы боремся с ним и до сих пор. Однако, так или иначе опыт наблюдения звездных циклов с помощью обратных доплеровских изображений

⁸ Ильин В.А. О работах А.Н. Тихонова по методам решения некорректно поставленных задач. УМН, 22:2 (134), 1967. С. 168–175.

постепенно накапливается. Можно надеяться, что через несколько десятков лет астрономы будут знать о циклах звездной активности так же много, как о циклах активности Солнца. Видимо, удастся узнать, правда ли, что эти циклы складываются в волны активности, которые, как и на Солнце, бегут от средних широт к экватору, или встречается и более разнообразное поведение активных образований. Пока данные на этот счет еще не вполне однозначны.

ЭКЗОПЛАНЕТЫ, ВСПЫШКИ И ЗВЕЗДНАЯ АКТИВНОСТЬ

Вероятно, читатель уже понял, что исследование звездных циклов требует терпения и настойчивости. Может быть, можно продвинуться вперед не за счет длительных наблюдений, а просматривая большое количество звезд? Конечно, цикл активности так трудно заметить, но ведь солнечная активность не сводится только к циклу, есть еще вспышки и другие кратковременные проявления активности⁹.

Здесь специалисты по звездной активности получили поддержку от ученых, которые ищут экзопланеты, т. е. планеты за пределами Солнечной системы. Один из методов поиска экзопланет состоит в наблюдении тени на звезде при прохождении экзопланеты по диску звезды. Примерно так же 6 июня 1761 г. М.В. Ломоносов наблюдал атмосферу Венеры во время ее прохождения по диску Солнца. Конечно, для успеха таких наблюдений нужно уметь отличать эту тень от звездных пятен.

⁹ Урнов А.М. Рентгеновские вспышки на Солнце. *ЗиВ*, 1980, № 1; Касинский В.В., Язев С.А. Солнечные протонные вспышки и их земные проявления. *ЗиВ*, 1993, № 4.

Сейчас наблюдения экзопланет – гораздо более популярная тема, чем многие другие направления астрономии. Сказывается эффект новизны, да и тема действительно интересная. Поэтому наблюдения экзопланет с помощью метода прохождений стали важной целью космической обсерватории «Кеплер» (NASA), работавшей с начала марта 2009 г. до середины ноября 2018 г. В отличие от других орбитальных телескопов, «Кеплер» следил непрерывно за сравнительно небольшим участком неба в области созвездия Лебедь. Находясь в умеренных широтах Северного полушария, легко найти «летний треугольник» из очень ярких звезд Альтаира, Веги и Денеба, куда был направлен этот космический телескоп. Основной «добычей» научной программы миссии «Кеплера» и затем, с апреля 2018 г., ее наследника космического телескопа TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite – спутник для исследования экзопланет транзитным методом) с гораздо большим охватом небесной сферы, стали свыше 4300 экзопланет почти в 3200 планетных системах. К настоящему времени есть еще около 2400 кандидатов в экзопланеты, для которых требуются подтверждения наземными инструментами¹⁰.

Заодно мы узнали больше и о кратковременных событиях в звездной активности. Как это часто бывает, эти вспомогательные результаты оказались не менее интересными и важными, чем основные. Выяснилось, что у звезд, похожих на Солнце, наблюдаются такие сильные вспышки, какие никогда в обозримое время не происходили на Солнце. Если бы такая вспышка

¹⁰ См.: Гадельшин Д.Р., Валявин Г.Г. Экзотариумы других солнц: крупные достижения в изучении внесолнечных планет. *ЗиВ*, 2020, № 3.

произошла сейчас, то, вероятно, пришлось бы выбросить все мобильные телефоны и другую современную электронную технику, разрушенную последствиями вспышки¹¹. Возможно, родители школьников, постоянно сидящих в интернете, и вздохнули бы с облегчением, но в целом такая перспектива кажется пугающей.

Естественно, эта новость вызвала интерес у научных работников разнообразных специальностей. Исходный результат был получен группой японских астрономов, руководимой Казунари Шибатой (Kazunary Shibata)¹². Будучи профессором университета в Киото в Японии, он привлек к анализу огромного наблюдательного материала, собранного в результате работы космической обсерватории «Кеплер» почти сотню студентов младших курсов, которые, по его мнению, обладали значительно большим количеством свободного времени, чем коллеги-астрономы. В результате такого ударного труда удалось обнаружить на звездах очень мощные вспышки с полной энергией, более чем в 1000 раз превышающие те,

что наблюдаются в современную эпоху на Солнце¹³.

Вообще говоря, звездные вспышки были известны ранее и неплохо изучены на красных карликах, потому и названных вспыхивающими. Такие звезды преобладают в звездном населении нашей Галактики. Температуры их поверхности почти вдвое холоднее, а радиусы меньше солнечных, и как минимум половина из этих звезд активна. Почти 70-летний опыт изучения активности красных карликов, в том числе и вспышек, дает основания полагать, что ее физическая природа сходна с солнечной.

Однако среди зарегистрированных «Кеплером» очень мощных вспышек обнаружены исключительно сильные явления на звездах, подобных Солнцу, т. е. их физические характеристики мало отличаются от Солнца. Именно это вызвало опасения, что такие катаклизмы могут произойти при нашей жизни. Дальнейший, более рафинированный анализ десятков тысяч звезд солнечной массы показал, что эти «супервспышки» происходят, во-первых, не чаще одного события в несколько тысяч лет, и звезды, на которых их регистрируют, по некоторым параметрам отличаются от нашего современного Солнца.

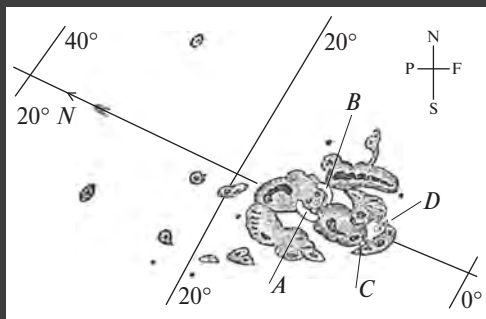
Прежде всего это относится к скорости вращения. Большинство супервспышек было зарегистрировано на быстровращающихся звездах, похожих на Солнце. В настоящее время ясно, что темп вращения звезды можно считать одним из индикаторов и возраста, и активности. Это дает возможность выбрать из множества звезд такие, которые могут быть аналогами Солнца на всех эволюционных стадиях его жизни.

¹¹ Мощность таких «солнечных штормов» достигает миллиардов мегатонн в тротиловом эквиваленте – столько энергии могли бы все страны потребить за миллион лет. Корональные выбросы массы в основном представлены электромагнитным излучением, которое, при точном попадании в Землю, вызывает геомагнитные бури, ее последствия – перебои в связи и отказ электроники. Например, 14 июля 2000 г. произошла солнечная вспышка класса X5.7, настолько сильная, что ее засекли даже АМС «Вояджер-1 и -2», находящиеся на краю Солнечной системы. По всей Земле наблюдались перебои и с радиосвязью.

¹² Maehara H., Shibayama T., Notsu S., Notsu Y., Nagao T., Kusaba S., Honda S., Nogami D., Shibata K. Superflares on solar-type stars. 2012, Nature, **485**, 478.

¹³ Богачев С.А., Кириченко С.А. Солнечные вспышки. ЗИВ, 2013, № 5.

Событие Кэррингтона



Так выглядела самая мощная из солнечных вспышек нового времени 1 сентября 1859 г. на зарисовках солнечного пятна британского астронома Ричарда Кэррингтона (R.Carrington) (вверху) и в современных изображениях полярного сияния и электрических разрядов на линиях высоковольтных передач вследствие геомагнитной бури (внизу)

В частности, это позволило представить активность Солнца в ранние эпохи его молодости, т. е. когда только шло формирование нашей Солнечной системы, Земли и ее биосферы.

Если смотреть относительно звезд, сегодняшнее Солнце обращается вокруг своей оси с периодом 25 суток; относительно земного наблюдателя этот период составляет в среднем 27 дней. Поэтому звезду, которая вращается в 5–10 раз быстрее Солнца, можно считать достаточно молодой, примерно во столько же раз моложе Солнца. Итак, стало понятно, что обнаруженные «Кеплером» супервспышки происходят, главным образом, на звездах-аналогах молодого Солнца.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ В ПРОШЛОМ

Что касается экстремальных событий на Солнце в недалеком прошлом, напомним, что 1–2 сентября 1859 г. произошла одна из крупнейших зарегистрированных геомагнитных бурь (по данным наземных магнитометров). Зарисовку большой группы солнечных пятен активной области, в которой произошла са-

мая мощная из солнечных вспышек современной эпохи инструментальных наблюдений, сделал британский астроном Ричард Кэррингтон (R. Carrington). В эти дни полярные сияния наблюдались по всему миру, в северном полушарии вплоть до Карибского моря; над Скалистыми горами в США. Они были настолько яркими, что это свечение разбудило золотодобытчиков – стихийных старателей, охваченных «золотой лихорадкой» середины XIX в., которые начали готовить завтрак, потому что думали, что наступило утро. Жители северо-востока США могли читать газету при свете полярного сияния, которое было видно очень далеко от полюсов, в таких регионах как Монтеррей в Калифорнии и Тампико в Мексике, Квинсленде, Кубе, Гавайях, южной Японии и Китае, и даже на более низких широтах, очень близко к экватору, например, в Колумбии. Тогда вышли из строя телеграфные системы по всей Европе и Северной Америке; в некоторых случаях телеграфисты получили поражение электрическим током. Пилоны телеграфа металы искры. Интересно, что некоторые телеграфисты смогли продолжать отправлять и получать сообщения, несмотря на отключение источников питания¹⁴.

Для выявления подобных катаклизмов, произошедших в более отдаленном прошлом, астрономы обращаются к ученым других специальностей, в частности к палеоклиматологам, геологам и др. Ясно, что в отсутствии прямых наблюдений применяются лишь косвенные методы, в частности, радиоуглеродный. Дендрохронология позволяет определять наличие изотопов углерода ^{14}C

в годовых кольцах на срезах стволов деревьев. Поскольку период полураспада ^{14}C составляет 5730 лет, этот метод используется только для датирования тех явлений, которые происходили в течение последних 50 тысяч лет. Похожий метод использует такие радионуклиды, как изотопы бериллия ^{10}Be и хлора ^{36}Cl , в кернах полярных льдов Гренландии и Антарктиды. Однако и здесь остается проблема низкого временного разрешения, в лучшем случае один год. Этими методами японским ученым Ф. Мияке (Miyake F.), К. Нагайя (Nagaya K.), К. Масуда (Masuda K.) и др. к 2013 г. удалось обнаружить несколько эпизодов экстремально мощных солнечных явлений, которые стали источниками обнаруженных аномалий концентрации этих изотопов. Так, в ходе нынешнего межледникового периода, называемого голоценом, который начался около 11 тысяч лет назад, наиболее сильные события на Солнце происходили около ~ 640 г. до н.э., примерно в 774/775 гг. н.э. и 993/994 гг. н.э. Полная энергии наиболее мощного из них события 775 г. оценивается величиной $\sim 2 \cdot 10^{33}$ эрг. Это примерно в 10 раз сильнее Кэррингтоновской вспышки 1859 г., но по крайней мере на порядок меньше энергии супервспышек, зарегистрированных на звездах, похожих на молодое Солнце.

Специалисты, интересующиеся сходством и различием активности Солнца и других звезд, постепенно разбираются со многими вопросами, которые важны для того, чтобы понять, насколько переменная активность Солнца может угрожать биосфере планеты и нашим интересам. Пока эти исследования не дают материала для сенсационных телевизионных фильмов. Это, наверное, к лучшему – не хотелось бы узнать о какой-нибудь надвигающейся катастрофе.

¹⁴ Ермолаев Ю.И. «Буря мглою небо кроет...» (Влияние «космической погоды» на человека и технику). *ЗиВ*, 2004, № 5.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ НА ЗЕМЛЕ, В КОСМОСЕ И НА ЛУНЕ



ИПАТОВ Александр Васильевич,

доктор технических наук, профессор

Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

ВЕДЕШИН Леонид Александрович,

доктор технических наук

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.7868/50044394821030051



В отличие от известной несколько веков назад оптической астрономии, исследования в области микроволновой радиоастрономии начались только в 1930-е годы, когда был создан первый в мире радиотелескоп, чтобы наблюдать природное излучение как объектов с очень высокой энергией, таких как активные ядра галактик или квазары, так и холодных, «темных объектов» – межзвездных молекулярных облаков и микроволнового фона Вселенной, который сегодня считается одним из главных подтверждений теории Большого взрыва. Исследования этих объектов проводятся на длинах волн от 1 мм до нескольких десятков и даже сотен метров. Особое развитие радиоастрономия получила в конце 1950-х годов в связи с началом космических исследований как для приема сигналов космических аппаратов, так и сигналов из дальнего космоса. Информация, поступающая с автоматических межпланетных станций, позволила сделать открытие нескольких классов космических объектов: пульсары, квазары и радиогалактики, и предоставила возможность ученым изучать самые далекие и мощные физические явления во Вселенной.

СИСТЕМА НАЗЕМНЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Данные наземных радиотелескопов по исследованию Луны, Солнца, солнечной активности и радарное картогра-

фирование планет Солнечной системы существенно дополняют информацию, полученную с помощью космических аппаратов. Для получения этих данных в Советском Союзе и за рубежом стали строить большие радиотелескопы. С целью повышения качества



Один из крупнейших в мире радиотелескоп РАТАН-600 обсерватории «Зеленчукская» в Карачаево-Черкесии. САО РАН

принимаемого сигнала и расширения диапазонов длин волн размеры радиотелескопов постоянно увеличиваются. Одним из крупнейших радиотелескопов в мире является РАТАН-600 (Радиоастрономический Телескоп Академии наук; Специальная астрофизическая обсерватория РАН в Карачаево-Черкесии, Россия; ЗиВ, 1981, № 3; 2016, № 5). Телескоп состоит из 895 прямоугольных отражающих элементов размерами 11.4×2 м, расположенных по кругу диаметром 576 м (эффективная площадь $15\,000\text{ м}^2$), работает на радиочастотах от 0.6 до 35 ГГц (рабочий диапазон волн: 0.8–50 см). Первое наблюдение состоялось 12 июля 1974 г., было принято излучение от радиоисточника PKS0521-36 на волне 3.9 см.

Одним из первых и крупнейших в мире был радиотелескоп в Аресибо (Национальный астрономический и ионосферный центр США в Пуэрто-Рико): диаметр зеркала рефлектора 304.8 м, радиочастоты: от 50 МГц до 10 ГГц (рабочий диапазон волн: 3–100 см), работал в 1963–2017 гг. Недавно в КНР закончено строительство

крупнейшего в мире радиотелескопа FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope – сферический телескоп с 5-метровой апертурой), или «Тяньянь» («Небесное око») с размером зеркала 500 м (эффективная площадь $196\,000\text{ м}^2$) из 4450 треугольных отражателей (радиочастоты: от 70 МГц до 3 ГГц), предназначенного для исследования Вселенной и поиска жизни на других планетах (ЗиВ, 2020, № 3). Для проведения исследований по программам международного сотрудничества страны стали связывать между собой в одну цепь радиотелескопы, даже установленные на разных континентах, создающие радиоинтерферометр со сверхдлинной базой – РСДБ-систему¹.

¹ Матвеевко Л.И., Кардашёв Н.С., Шоломицкий Г.Б. О радиоинтерферометре с большой базой. Радиофизика. 1965. Т. VIII, № 4. С. 651. Матвеевко Л.И. Распределение радиояркости в Крабовидной туманности на волне 32.5 см // АЖ. 1969. Т. 46, № 2. С. 250–259. Матвеевко Л.И. и др. Сверхдальняя радиоинтерферометрическая сеть на волне 18 см // ПАЖ. 1986. Т. 12, № 1. С. 59–65.

а



б



в



г



Крупнейшие радиотелескопы мира: а – Аресибо (Пуэрто-Рико, США); б – FAST («Небесное око», КНР); Радиотелескопы радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» ИПА РАН: в, г – РТ-13 и РТ-32 в обсерватории «Зеленчукская» в Карачаево-Черкесии

Институтом прикладной астрономии РАН (ИПА РАН) создана сеть радиотелескопов «Квазар-КВО» (радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО»), состоящая из обсерваторий: «Светлое», «Бадары» и «Зеленчукская» (ЗиВ, 2004, № 4), которые проводят высокоточные радиотехнические наблюдения с помощью шести действующих радиотелескопов: трех диаметром 13 м (РТ-13) и трех диаметром 32 м (РТ-32), расположенных в трех регионах России – Ленинградской области, Республики Бурятия и Карачаево-Черкесии².

На основании полученных данных ученые ИПА РАН и других научных институтов выполняют исследования в области астрономии, космической геодезии, небесной механики и др. Высокоточные радиотехнические наблюдения космических аппаратов и естественных тел Солнечной системы, проводимые этими обсерваториями, вносят весомый вклад в создание информационной базы измерений, используемых для построения эфемерид Луны, планет, спутников планет и астероидов.

Ученые ИПА РАН также принимают активное участие в международных геодезических проектах: IGS (Международная служба глобальных навигационных спутниковых систем; объединяет 200 агентств мира, занимающихся сбором данных GPS, ГЛОНАСС

² Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО». Институт прикладной астрономии Российской академии наук [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/> (дата обращения 28.12.2020).



Сеть радиотелескопов «Квазар-КВО» (радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО») на территории России. ИПА РАН

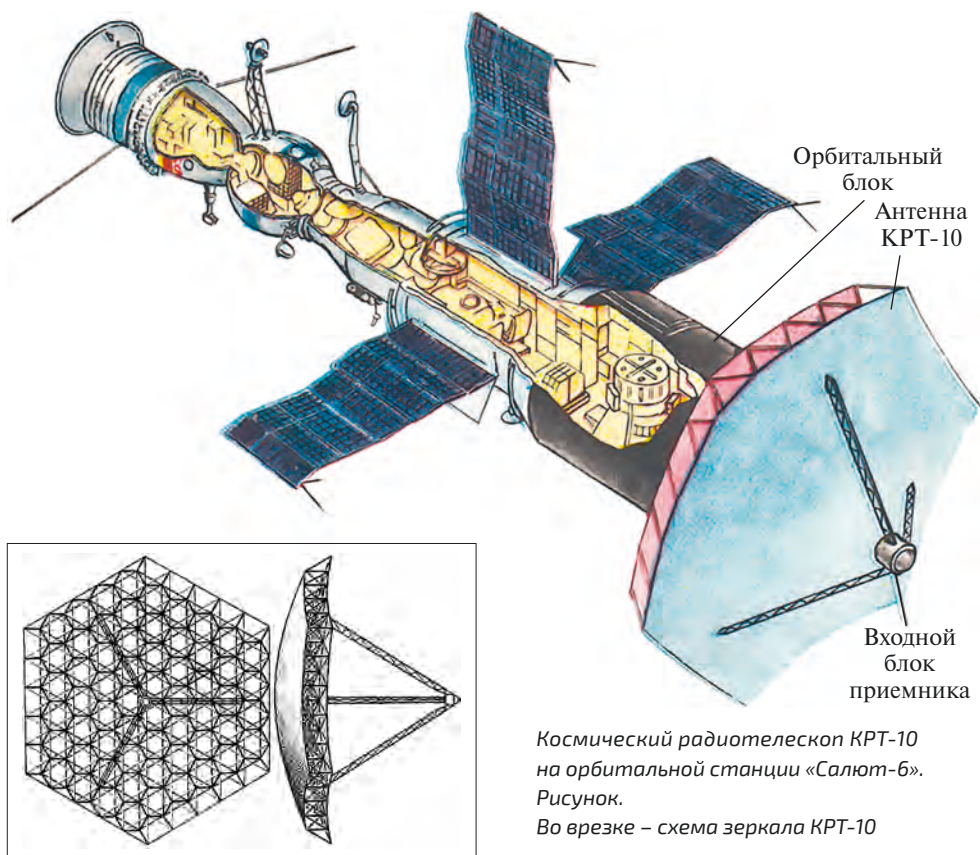
и других навигационных систем), IDS (DORIS – французская гражданская система точного определения орбиты и позиционирования) и др. В ИПА РАН имеется большой опыт наблюдений навигационных систем ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Beidou (КНР), космических аппаратов серии «Космос», «Спектр-Р» (космическая обсерватория «РадиоАстрон», 2011–2019 гг.), «Марс Экспресс» (АМС «Mars Express», ESA; 2004–2020 гг.), лунного посадочного аппарата «Чанъэ-3» (Chang'e-3, КНР; 2013 г.) и астероидов, сближающихся с Землей. В рамках международного сотрудничества задействованы: подсвечивающий телескоп в Голдстоуне, принимающие телескопы РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» и РТ-70 в Евпатории. Несмотря на использование принципа радиоинтерферометрии, объединившего радиотелескопы всего мира, находящиеся на больших расстояниях и на разных континентах, даже размеры Земли стали малы для приема дальних сигналов Вселенной (ЗиВ, 1978, № 1).

ПЕРВЫЙ В МИРЕ СОВЕТСКИЙ КОСМИЧЕСКИЙ РАДИОТЕЛЕСКОП КРТ-10

Советские ученые в 1979 г. предложили установить радиотелескоп на борту космического аппарата и провести первый в мире эксперимент по радиоастрономии с космической базой. Проверкой этой идеи стал запуск радиотелескопа КРТ-10 весом 300 кг на орбитальную станцию «Салют-6» грузовым кораблем «Прогресс-7». Первый в мире радиотелескоп КРТ-10 был разработан в НПО «Комета», его тестирование и калибровка проведены в Пушинской радиоастрономической обсерватории. КРТ-10 состоял из трех блоков: главного зеркала, с раскрывающейся параболической антенной диаметром 10 м, фокального контейнера с облучателем (высокочувствительные радиоприемники-радиометры, длины волн 12 см и 72 см) и тремя раздвижными опорами и механизмом

крепления. В качестве отражающей поверхности использовалась специально разработанная вязаная сетчатая ткань из металлических проволок диаметром 50 мкм. Масса зеркала составляла 65 кг, а в сложенном виде оно представляло собой шестиугольную призму с максимальным размером 0.5 м у основания и общей длиной 0.9 м. 17 июля 1979 г. космонавты Владимир Ляхов и Валерий Рюмин выполнили стыковку, монтаж всех блоков и укрепили КРТ-10 на промежуточной камере станции. После отделения корабля «Прогресс-7» космонавты провели выдвижение элементов конструкции радиотелескопа в открытое космическое пространство. По команде из Центра управления полетом в подмосковном г. Королёве на раскрытие антенны космонавты провели юстировку КРТ-10 и снятие диаграммы его направленности. С этой целью была проведена регистрация радиоизлучения Крабовидной туманности (источника Кассиопея А), Солнца и наземного радиоисточника. Результаты измерений оказались близки к расчетным. Направление антенны на источника радиоизлучения каждый раз осуществлялось поворотом всей орбитальной станции. 24 июля 1979 г. с помощью КРТ-10 космонавты впервые в мире с борта станции провели астрофизические наблюдения: радио-картографирование Млечного Пути, Солнца и наблюдения пульсара PSR0329+054, а также радиометрические исследования источников на поверхности Земли. 9 августа работы по научной программе с телескопом КРТ-10 были завершены и радиотелескоп был отделен от станции, но в момент отстрела раскрытой антенны четыре тросика зацепились за стыковочную мишень на станции «Салют-6». 15 августа Владимиру Ляхову и Валерию Рюмину пришлось выйти в открытый космос, чтобы освободить антенну (ЗиВ, 1980, № 4).

Этот эксперимент преследовал в основном технологические цели – отработку раскрытия в космосе антенны большого диаметра, методы ее наведения и калибровки. Реализация проекта КРТ-10 показала большие возможности космической радиоастрономии для современных астрофизических исследований, позволила провести испытания многих элементов конструкции космического радиотелескопа и отработать методику проведения таких экспериментов в космосе. После проведения астрофизических экспериментов с КРТ-10 на станции «Салют-6» специалисты НПО «Энергия» (ныне – РКК «Энергия» им. С.П. Королёва) совместно с лабораторией космической астрономии ИКИ АН СССР в 1979 г. подготовили научно-технические предложения по продолжению работ с новыми космическими радиотелескопами КРТ-10 и КРТ-30 с диаметром зеркала 30 м, опытный образец которого разрабатывался на авиазаводе в г. Ташкенте. Проект КРТ-30 назывался «Радиоастрономическая космическая система апертурного синтеза» и предусматривал создание орбитального наземно-космического радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) для пилотируемой орбитальной станции. Предполагалось, что радиотелескоп КРТ-30 позволит гораздо быстрее наземной РСДБ-системы создавать разные по длине и направлению базы, быстро и качественно «синтезировать апертуру» гигантского радиотелескопа с диаметром зеркала, сравнимым с диаметром Земли. Руководил разработкой этого проекта в ИКИ АН СССР член-корреспондент АН СССР Н.С. Кардашёв с участием ученых Л.И. Матвеевко, Г.Б. Шоломицкого, В.В. Андрианова и др., внесших большой вклад в создание космических радиотелескопов (ЗиВ, 2003, № 4). В 1983 г. работы по проекту КРТ-30 были завершены. При детальном рассмотрении оказалось, что пилотируемая станция – не самая



Космический радиотелескоп КРТ-10
на орбитальной станции «Салют-6».
Рисунок.

Во врезке – схема зеркала КРТ-10

подходящая платформа для установки массивного и габаритного прецизионного инструмента, требующего многочасовых режимов высокоточной инерциальной ориентации. Это обстоятельство стало очевидным после эксперимента на станции «Салют-6», т. к. для проведения наблюдений космических источников приходилось бы каждый раз разворачивать станцию в ущерб другим экспериментам. Одновременно в 1978 г. отдел космической астрономии ИКИ АН СССР и НПО им. С.А. Лавочкина начали разрабатывать проект космической обсерватории «РадиоАстрон» для вывода ее на высоко-апогейную околоземную орбиту, чтобы создать РСДБ-систему с наземными радиотелескопами (ЗиВ, 1980, № 4). В 1980 г. проект был официально закреплен постановлением советского правительства, в 1983 г. был принят

план запуска космического аппарата «Спектр-Р» в 1987 г. Работы по проекту «РадиоАстрон» возглавил заместитель директора ИКИ АН СССР Н.С. Кардашёв (1932–2019; ЗиВ, 2012, № 2).

Методически и составом аппаратуры КРТ-30 и «РадиоАстрон» в значительной мере совпадали и выполнялись одним и тем же коллективом. «РадиоАстрон» был задуман как наземно-космическая РСДБ-система, кардинально отличающаяся от КРТ-30 по решаемым задачам. КРТ-30 был предназначен в основном для высококачественного картографирования космических радиоисточников примерно с таким же угловым разрешением, которое доступно наземным радиоинтерферометрам. «РадиоАстрон», уступая в качестве картографирования, должен был позволить наблюдать в структуре космических источников



Научный руководитель проекта
«РадиоАстрон» академик РАН Н.С. Кардашёв

чрезвычайно компактные детали, недоступные другим инструментам. «РадиоАстрон» должен был быть установлен на космическом аппарате «Спектр-Р», который выводился на высоко-апогейную околоземную орбиту. В отличие от проекта КРТ-30, реализуемого в НПО «Энергия», роль головной организации была поручена НПО им. С.А. Лавочкина. Работы над проектом «РадиоАстрон» привлекли внимание зарубежных ученых, заинтересованных в международном сотрудничестве в области космической радиоинтерферометрии³.

РОССИЙСКИЙ КОСМИЧЕСКИЙ РАДИОТЕЛЕСКОП «СПЕКТР-Р»

После успешного полета пилотируемой орбитальной станции «Салют-6» с радиотелескопом КРТ-10 в рамках программы «Интеркосмос» в 1979–1980 гг. с участием иностранных ученых началась разработка трех международных космических проектов: «Спектр-Р» («РадиоАстрон»),

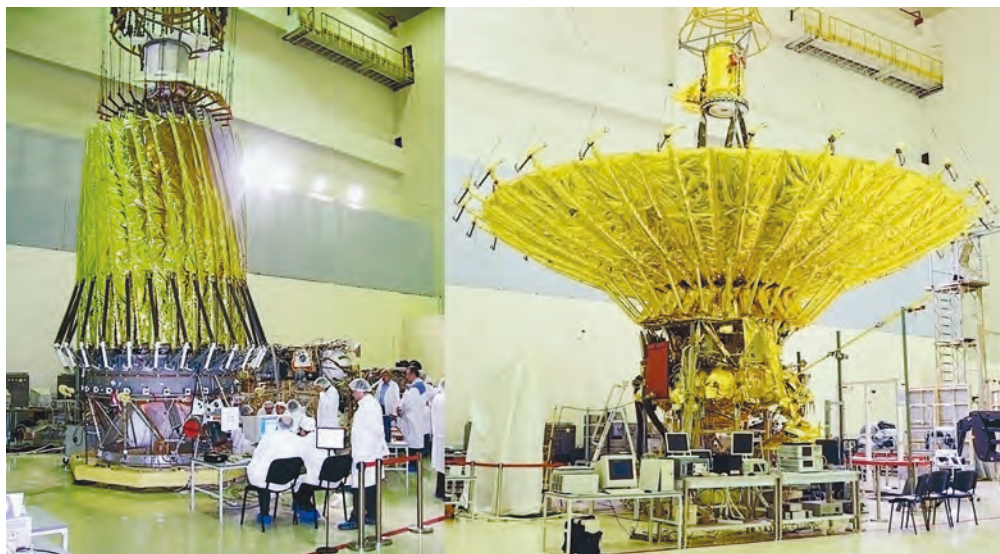
«Спектр-РГ» («Спектр-Рентген-Гамма») и «Спектр-УФ» («Ультрафиолет») (ЗиВ, 1989, № 1; 2000, № 4; 2006, № 5; 2009, № 6). Проект «Спектр-Р» предназначался для астрофизических исследований в радиодиапазоне электромагнитного спектра с помощью космического радиотелескопа «РадиоАстрон» с параболической антенной диаметром 10 м. Разработка космического аппарата «Спектр-Р» была поручена НПО им. С.А. Лавочкина. Несмотря на многократные переносы сроков изготовления аппаратуры и доработки проекта космического аппарата «Спектр-Р», космическая обсерватория (радиотелескоп) «РадиоАстрон» был запущен на высокоэллиптическую орбиту 18 июля 2011 г. ракетой-носителем «Зенит-2» с разгонным блоком «Фрегат-2СБ» с космодрома Байконур (ЗиВ, 2011, № 6. С. 17–18)⁴.

Радиотелескоп был разработан Астро-космическим центром (АКЦ) ФИАН под руководством академика Н.С. Кардашёва с участием ИКИ РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша и др. Космическая обсерватория (радиотелескоп) «РадиоАстрон» массой 2600 кг состояла из раскрывающейся антенны, электронного комплекса, содержащего приемники, усилители, синтезаторы частот, блоки управления, преобразователи сигналов, стандарты частоты, высокоинформативную систему передачи научных данных (около 900 кг). Параболическая антенна радиотелескопа диаметром 10 м и массой 1500 кг состояла из 27 лепестков, изготовленных из углепластика. При выведении на орбиту антенна находилась в сложенном (аналогично зонту) состоянии. После

³ Ведешин Л.А. О реализации и координации российских и международных проектов дистанционного зондирования планет Солнечной системы и Галактики. Труды ИПА РАН, 2019. Вып. 48. С. 21–25.

⁴ Торгашев А. Россия у черной дыры. «РадиоАстрон»: неоконченная история крупнейшего научного проекта России в космосе // Кот Шредингера. Российская газета, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2016/07/28/kot-blackhole.html> (дата обращения 28.12.2020).

а



б

Космическая обсерватория
«РадиоАстрон»
на ИСЗ «Спектр-Р»:
а – радиоантенна
в сложенном и развернутом
положении во время
подготовки к запуску
на космодроме
Байконур; б – запуск
18 июля 2011 г. ракетой-
носителем «Зенит-2».
Фото госкорпорации
«Роскосмос»



достижения целевой орбиты выполнено механическое раскрытие антенны радиотелескопа. Антенна работала в радиочастотах: от 0.32 до 4.83 ГГц (рабочий диапазон волн: 6.2–92 см). Шириной интерференционного лепестка определяется угловое разрешение радиointерферометра.

«Спектр-Р» массой 3850 кг был выведен на эллиптическую орбиту с периодом обращения 8.2 суток и апогеем 340 000 км, сравнимого с расстоянием до Луны, и использовал лунную

гравитацию для поворота плоскости своей орбиты. Основу проекта составлял наземно-космический радиointерферометр, состоящий из сети наземных радиотелескопов и космического радиотелескопа. Вместе с наземными радиотелескопами он создавал рекордный интерферометр 330–360 тыс. км. «РадиоАстрон» стал чемпионом в радиointерферометрии со сверхдлинными базами. Суть эксперимента заключалась в одновременном наблюдении одного радиоисточника наземным



Космическая обсерватория «РадиоАстрон» на орбите.
Рисунок

и космическим радиотелескопами при синхронизации их работы от одного стандарта частоты для изучения солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, галактик, квазаров, черных дыр и нейтронных звезд⁵. В качестве синхронных радиотелескопов использовались два стометровых телескопа в Грин-Бэнк (Западная Виргиния,

⁵ Кардашёв Н.С., Белоусов К.Г., Бирюков А.В. и др. Технические решения и практика эксплуатации приборного комплекса космического телескопа наземно-космического радиоинтерферометра РадиоАстрон // Труды ИПА РАН, 2018. Вып. 47. С. 31–37.



США) и в Эффельсберге (Германия), а также радиобсерватория Аресибо (Пуэрто-Рико). В ноябре 2011 г. ИПА РАН совместно с АКЦ ФИАН были успешно проведены одновременные наблюдения в интерферометрическом режиме с помощью «РадиоАстрона» и трех российских радиотелескопов РТ-32, расположенных в обсерваториях «Светлое», «Бадары» и «Зеленчукская», образующих радиоинтерферометрическую сеть

«Квазар-КВО», а также крымским радиотелескопом РТ-70 в Евпатории. Целью этого эксперимента были наблюдения пульсара PSR B0 531+21 в Крабовидной туманности, квазары 0016+731 и 0212+735 (для изучения квазара 0212+735 дополнительно был задействован радиотелескоп в Эффельсберге), а также источники мазерного излучения W3 (OH). В месяц проводилось около 100 научных экспериментов.

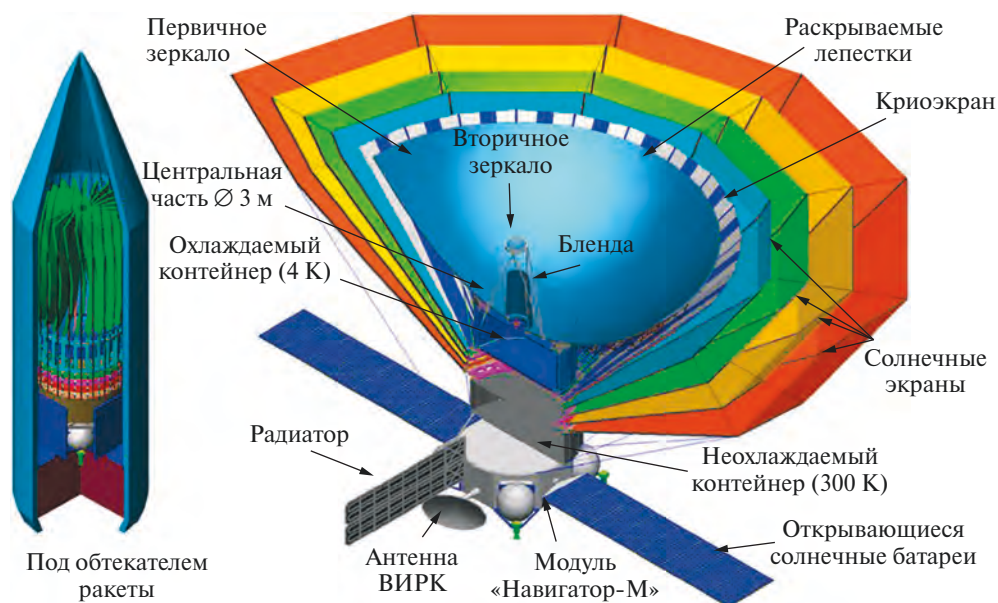
Наземно-космический интерферометр с такой базой позволял получить информацию о морфологических характеристиках и координатах галактических и внегалактических радио-

Иллюстративное изображение квазара 3C 273 в созвездии Девы (расстояние – 2.44 млрд св. года; 735 млн пк): хорошо виден аккреционный диск и вещество, падающее в центральную сверхмассивную черную дыру массой $8.86 \pm 1.87 \times 10^{11} M_{\odot}$ и «закручивающееся» в разнонаправленные потоки плазмы – джеты. Первый астрономический объект, открытый в 1959 г., идентифицированный в качестве квазара. Источник: <https://prokoscmos.ru/kvazar/kvazar-3c-273/>

источников с шириной интерференционных лепестков до 8 мкс дуги для самой короткой волны (1.35 см). Высокое разрешение при наблюдении радиоисточников обеспечивалось за счет большого плеча интерферометра, равного высоте апогея орбиты. Шириной интерференционного лепестка определяется угловое разрешение радиоинтерферометра, например, на волне 92 см «РадиоАстрон» смог различать два источника радиоизлучения, расположенных на угловом расстоянии 540 мкс и более друг от друга, а на волне 6.2 см – еще более близкие, до 37 мкс и более. В рамках международной программы «РадиоАстрон» ученые провели более 5 тыс. научных экспериментов и исследовали несколько сотен объектов: ядер галактик, квазаров, пульсаров и областей звездообразования. По каждому направлению исследования получены выдающиеся результаты и опубликовано более 50 научных статей в ведущих рецензируемых журналах.

С помощью радиотелескопа обнаружены ударные волны и спиральное магнитное поле в основании джета галактики, открыта беспрецедентно высокая яркость квазара 3C273 в созвездии Девы (температура 10–40 триллионов градусов, что в 10 раз выше значений, которые допускает теория), получен «рентгеновский снимок» нашей галактики, сделаны другие открытия. Наблюдения с космической обсерватории «РадиоАстрон» с 2011 по 2019 г. проводились АКЦ ФИАН по заявкам многих государств (ЗиВ, 2019, № 5). Получены данные по более 60 квазарам, а также по пульсарам и мегамазерам. 30 мая 2019 г. в связи с истечением гарантийного срока работы, дважды продленного начиная с 2014 г., «Роскосмос» принял решение о завершении проекта «Спектр-Р».

В АКЦ ФИАН продолжают работы по созданию новой космической обсерватории «Спектр-М» («Миллиметр»), работающей в миллиметровом



Космическая обсерватория «Спектр-М» («Миллиметр»). Проект АКЦ ФИАН



Радиоантенна космической обсерватории «Миллиметрон» в развернутом положении во время испытаний. Фото госкорпорации «Роскосмос»

и инфракрасном диапазонах длин волн (от 20 мкм до 17 мм) с криогенным телескопом диаметром 10 м. Проект задуман еще в 1990-е годы академиком Н.С. Кардашёвым, но в связи со сложностью технических задач, многие из которых приходится решать впервые, реализация замысла не раз откладывалась. Предполагается, что телескоп сможет работать как в режиме одиночного телескопа, так и в составе радиоинтерферометра с базами Земля – космос, как крупнейший виртуальный радиотелескоп, способный исследовать структуру ядер галактики, черных дыр, пульсаров, исследовать реликтовое излучение, состав, структуру и динамику наиболее холодных газопылевых облаков, экзопланеты и пылевые оболочки звезд, найти следы формирования Вселенной. Научная программа проекта «Миллиметрон» включает три основных направления исследований:

– физические процессы в ранней Вселенной: в режиме одиночного зер-

кала «Миллиметрон» попытается обнаружить искажения в спектре реликтового излучения, что впервые даст ученым возможность заглянуть в «невидимую» часть Вселенной в эпоху до рекомбинации, когда она была непрозрачной для излучения;

– исследование активных ядер галактик: за счет рекордной чувствительности и беспрецедентного углового разрешения «Миллиметрон» позволит проверить гипотезу существования кротовых нор, он сможет исследовать структуры магнитных полей вблизи гипотетических входов кротовых нор и возможные истечения материи из этих областей;

– происхождение жизни во Вселенной: именно в терагерцевом диапазоне, в котором будет наблюдать «Миллиметрон» объекты в небесной сфере, расположено большое количество молекулярных линий для сложных молекул, так называемых пребиотиков, без которых существование жизни, по

современным представлениям, невозможно, ученые смогут изучать протопланетные диски, некоторые экзопланеты, атмосферы этих планет и планеты земного типа.

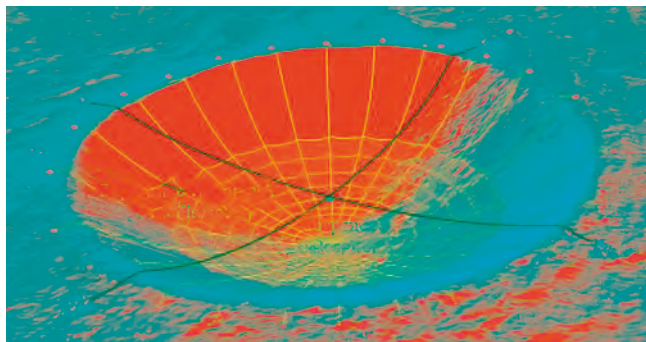
Аналогов проекту «Миллиметрон» нет ни в одной стране мира в ближайшие 15 лет. Его запуск планируется в 2027 г.

ПРОЕКТЫ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ НА ЛУНЕ

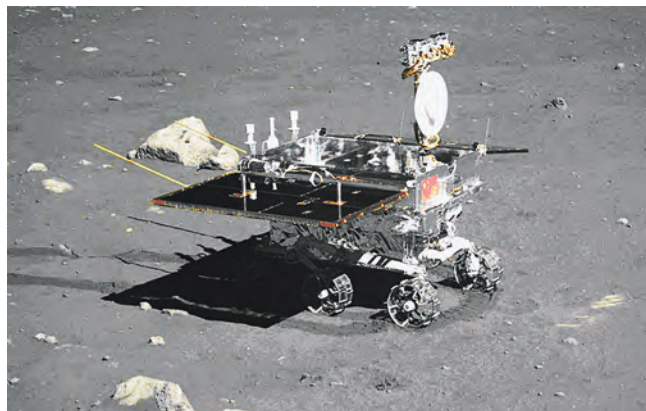
Исследователи сталкиваются с большим количеством трудностей при проведении радионаблюдений галактических источников с земной поверхности, т. к. атмосфера нашей планеты выступает в роли экрана, который поглощает, рассеивает и отражает заметную часть электромагнитных волн, в результате чего для наблюдателя остаются доступными лишь т. н. «атмосферные окна». «Радиоокно» охватывает только диапазон длин волн от нескольких миллиметров до 30 м, что эквивалентно частотам от 100 ГГц до 10 МГц. Кроме того, радиосигналы, поступающие от различных объектов в космосе, обычно очень слабы – в миллионы (миллиарды) раз слабее сигналов, которые используют системы связи. Даже сотовый телефон на Луне будет довольно сильным источником радиоизлучения по сравнению с теми, которые приходится исследовать радиоастрономам. Существующие на Земле приборы способны генерировать серьезные помехи, которые могут мешать наблюдениям. Причем слабые шумы могут быть более опасны, чем сильные сигналы, т. к. они могут загрязнить

данные, собранные радиотелескопами, что может привести к ошибочным интерпретациям. Одним из решений вышеупомянутых проблем могут стать космические телескопы, которые расположены вдалеке от большинства источников шума. До 2019 г. на орбите работала российская обсерватория «РадиоАстрон», благодаря которой удалось проверить множество теорий. Для возобновления космических радионаблюдений Вселенной в мире реализуется несколько космических проектов: проведение запуска новых астрофизических станций на орбиту Земли, создание искусственного спутника Луны с радиотелескопом и лунной радиоастрономической обсерватории.

NASA уже одобрило амбициозный проект по постройке радиотелескопа на обратной стороне Луны в кратере, где инструмент будет защищен от шума и помех, исходящих от наземных источников, ионосферы, ИСЗ и от Солнца на время лунной ночи. Телескоп планируется установить в кратере диаметром 3–5 км. При этом создание радиотелескопа по проекту Lunar Crater Radio Telescope пройдет без участия человека – этим займутся роботы-планетоходы. Предполагается, что радиотелескоп сможет вести наблюдения на длинах волн от 10 до 50 м, т. е. покрыть



Радиотелескоп с зеркалом диаметром 1 км на Луне по проекту Lunar Crater Radio Telescope. Рисунок NASA



Китайский луноход «Юйту-2» на обратной стороне Луны.
Фото CNSA

частоты от 6 до 30 Мгц, что поможет астрономам лучше изучить раннюю Вселенную. В рамках первой фазы программы исследователи должны завершить в ближайшее время первый этап проекта.

В январе 2019 г. китайский луноход «Юйту-2» на посадочной ступени «Чанъэ-4» совершил мягкую посадку на обратную сторону Луны (ЗиВ, 2019, № 1. С. 86–88). Связь лунохода с Землей обеспечивается спутником «Цюэцяо», который выведен на гало-орбиту вокруг точки Лагранжа L2 системы Земля – Луна. На нем установлен нидерландско-китайский NCLE радиотелескоп. Он частично развернул антенны в конце 2020 г. Китайские специалисты пока не пытались раскрыть аппаратуру полностью и ведут тестовые наблюдения. NCLE регистрирует радиосигналы в радиолинии нейтрального водорода в диапазоне 21 см, что соответствует ранним периодам космической истории. Этот период начался спустя 380 тыс. лет после Большого взрыва и продлился около 100 млн лет. Расположение NCLE в тени Луны считается идеальным для таких экспериментов, поскольку оно удалено от любых наземных радиопомех. На данном

этапе ученые столкнулись с трудностями при разворачивании антенн. В текущем состоянии NCLE способен фиксировать сигналы лишь 13 миллиардной доли, образованные спустя 80 млн лет после Большого взрыва. В будущем ученые рассчитывают увидеть с помощью радиотелескопа рождение звезд и их скоплений, образующих первые галактики. Габариты этого радиотелескопа скромнее проекта Lunar Crater Radio Telescope –

размер трех монопольных антенн, чувствительных к радиочастотам в диапазоне 80 Кгц – 80 Мгц и расположенных под прямым углом друг к другу, составляет всего 5 м. Тем не менее даже такой инструмент при полноценной работе сможет рассказать о том, какой была Вселенная спустя 380 тыс. лет после Большого взрыва, когда пространство стало прозрачно для радиоволн. Если проект Lunar Crater Radio Telescope будет реализован, то научное сообщество получит гораздо больший поток новых данных об этом периоде жизни Вселенной. Радиоастрономы при выборе места размещения радиотелескопов на Луне отдают предпочтение постоянно затененным областям – кратера Шеклтона и бассейна Босха.

Научный руководитель ИКИ РАН академик Л.М. Зелёный предложил начать строительство астрофизической станции на Луне в 2030 г. Планируется размещение в полярной области Луны двух обсерваторий – для радиоастрономических исследований с целью приема радиоизлучения самых далеких космических объектов в других галактиках и исследования космических лучей высокоэнергичных заряженных частиц. В будущем их число будет увеличиваться. Доставка

аппаратуры будет осуществляться сверхтяжелым носителем. Строительством обсерваторий займутся роботы. В соответствии с планами госкорпорации «Роскосмос» начало работ по созданию астрофизической базы на Луне возможно после посадки российского лунохода в 2029 г., который будет управляться роботом⁶. В 2019 г. АО Корпорация «Стратегические пункты управления» (входит в состав «Роскосмоса») разрабатывает проект лунной базы Patron Moon с небольшой атомной электростанцией, на которой смогут жить 50 человек.

Сверхдлинные волны из космоса на Землю не проходят, потому что они отражаются от ионосферы. Размещать радиотелескопы далее на спутниках нецелесообразно из-за слишком значительных размеров и большого количества приемников излучения с длиной волны 20 м. Ученые АКЦ ФИАН предлагают построить обсерваторию на Луне со сверхдлинноволновым диапазоном – это единственное окно электромагнитного спектра, которое до сих пор не открыто. При установке радиотелескопа на обратной стороне Луны в кратеры на полюсах или на краю кратера потребуются спутник-ретранслятор. Возможен также вариант установки радиотелескопа на спутнике в точке Лагранжа L2 системы Земля – Луна, когда во время проведения исследований он будет затеняться Луной от Земли и будет защищен от антропогенных помех. В Китае уже осуществляется такой проект по установке антенн радиолокатора



Один из проектов астрофизической станции на Луне.
Рисунок

как на посадочном аппарате на обратной стороне Луны, так и на спутнике-ретрансляторе. В этом случае мы будем иметь радиоинтерферометр со сверхдлинными базами в сверхдлинноволновом диапазоне. Сотрудники ИПА РАН разрабатывают концепцию создания на Луне радиотелескопа, который будет наблюдать удаленные космические объекты (квазары) совместно с обсерваториями, расположенными на Земле, что даст возможность получать карты внегалактических источников со сверхвысоким разрешением, а также построить более точную небесную систему координат. Получение сигналов с удаленных внегалактических объектов и их обработка позволит уточнить данные о траектории движения Луны, взаимном движении Земли и ее естественного спутника. Эта информация будет важна при реализации других проектов, связанных с освоением Луны. Ученые предлагают включить этот проект в следующую космическую программу России.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

⁶ Зелёный Л.М. Нам нельзя медлить в освоении Луны // Журнал «Все о космосе», 2017. С. 217–232.

КОУРОВКА – ОБСЕРВАТОРИЯ И АСТЕРОИД

ГОРДА Станислав Юрьевич,

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, доцент

СОБОЛЕВ Андрей Михайлович,

*кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,
директор Коуровской астрономической обсерватории*

КУЗНЕЦОВ Эдуард Дмитриевич,

*доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой
астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды, доцент*

*Кафедра астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды,
Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета
(ИЕНиМ УрФУ), г. Екатеринбург, Россия*

*Коуровская астрономическая обсерватория Института естественных наук и математики
Уральского федерального университета (ИЕНиМ УрФУ), г. Екатеринбург, Россия*

DOI: 10.7868/50044394821030063

НЕМНОГО ИСТОРИИ

В январе далекого 1965 года в 85 километрах к западу от Свердловска, ныне Екатеринбурга, была открыта Коуровская астрономическая обсерватория Уральского государственного университета им. А.М. Горького. Наименование обсерватории было выбрано по названию ближайшей железнодорожной станции Коуровки, поскольку добраться тогда до нее можно было исключительно по железной дороге. Своим появлением обсерватория обязана профессору Клавдии Александровне Бархатовой, возродившей в 1960 году кафедру астрономии в Уральском университете. Ее неутомимая энергия, а также царивший в те годы в нашей стране и в мире настоящий бум покорения космического пространства позволили основать новую астрономическую обсерваторию как загородную станцию наблюдений искусствен-

ных спутников Земли. Строительство станции было задумано с целью практического обучения студентов кафедры навыкам наблюдений ИСЗ и естественных небесных тел. Не обошлось и без некоторого парадокса. Так, находясь на одном материке, обсерватория и Уральский университет, которому она принадлежит, находятся в разных частях света. Обсерватория – в Европе, а университет – в Азии. Виной всему Уральский хребет, по которому проходит граница между этими частями света, поскольку город Екатеринбург располагается восточнее хребта, а обсерватория – западнее. Таким образом, она является самой восточной в Европе обсерваторией.

По тем временам Коуровская обсерватория была оснащена довольно крупными для университетской обсерватории и современными инструментами, два из которых работают и сейчас. Это телескоп-рефлектор АЗТ-3 с диаметром зеркала 453 мм



Панорама телескопов коуровской обсерватории, слева направо: телескоп с диаметром зеркала 1.2 метра, купол телескопа-рефлектора АЗТ-3, павильон телескопа Мастер-Урал, телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 70 см., телескоп системы Шмидта СБГ, целостат солнечного телескопа

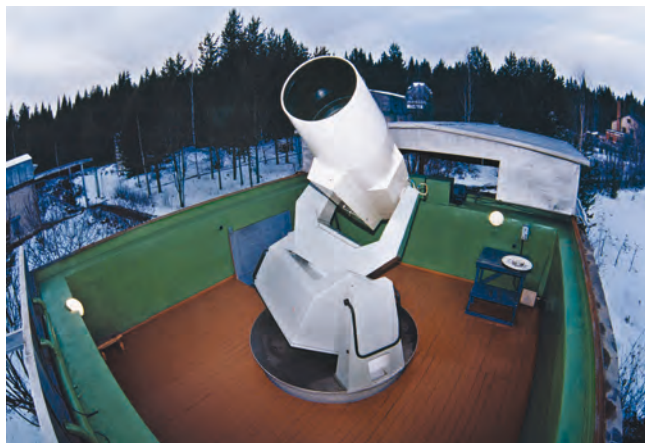
и горизонтальный солнечный телескоп АЦУ-5. Надо сказать, что подобными инструментами были оснащены несколько обсерваторий страны. Так, телескопы АЗТ-3 (АСТ-453), изготовленные на Казанском оптико-механическом заводе, были поставлены в обсерватории Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) и Казанского университетов, Одесскую обсерваторию в Маяках и др. Спутниковые наблюдения проводились в основном визуально на трубках ТЗК и морском бинокляре БМТ, пока в 1974 г. не вступила в строй астро-геодезическая камера немецкого производства SBG (фирмы Carl Zeiss), представляющая собой телескоп Шмидта с диаметром коррекционной пластины 400 мм, установленный на четырехосной монтировке. С началом работы этого телескопа наблюдения спутников стали проводиться фотографическим методом, что существенно повысило точность определения положений ИСЗ.

Основной по тем временам звездный телескоп обсерватории АЗТ-3 был оснащен фабричным электрофотометром АФМ-6, на нем проводились наблюдения переменных звезд и звездных скоплений.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБСЕРВАТОРИИ

Изначально на обсерватории было организовано три отдела по научной тематике – это звездный отдел, отдел физики Солнца и отдел наблюдений искусственных спутников Земли (ИСЗ). В обиходе для краткости сотрудники отделов именовались соответственно: звездники, солнечники и спутниковцы, а сама обсерватория – Коуровка.

Основными направлениями научных исследований звездного отдела были и остаются до настоящего времени исследования рассеянных звездных скоплений, структуры Нашей Галактики и изучение переменных звезд. Первые два направления были заложены основателем кафедры и обсерватории Клавдией Александровной Бархатовой. Исследования переменных звезд были инициированы Марием Анатольевичем Свечниковым, исследователем переменных звезд с мировым именем, работавшим тогда на кафедре астрономии и геодезии Уральского университета.



Астрогеодезическая камера системы Шмидта на четырехосной монтировке может отследить практически любой ИСЗ

Базовыми темами исследования отдела физики Солнца являлись мониторинг магнитных полей солнечных пятен, исследование структуры и спектров солнечных пятен и протуберанцев. За годы существования обсерватории получена большая база данных карт и значений магнитных полей солнечных пятен. Полученные данные посылаются и регистрируются в программе «Служба Солнца» уже на протяжении 55-ти лет. Спектрофотометрические исследования протуберанцев и солнечных пятен также составляют существенную долю в научной деятельности солнечников.

Сотрудники отдела наблюдений ИСЗ на телескопе SBG занимались позиционными наблюдениями искусственных спутников Земли, астероидов и комет. Долгое время основными объектами наблюдений являлись геостационарные (геосинхронные) спутники. Это спутники, имеющие период обращения вокруг Земли, равный одним звездным суткам, и поэтому как бы «висящие» над одной точкой Земли в районе экватора. Большинство из них имеет важное военно-стратегическое или хозяйственное значение. К примеру, все

спутниковые телевизионные антенны-тарелки, в изобилии «украшающие» стены и балконы зданий современных городов и прочих населенных пунктов, направлены на один из таких спутников и «ловят» с него телевизионный сигнал.

Кроме задач наблюдательного характера, решаемых на инструментах Коуровки, в обсерватории проводятся исследования теоретического и интерпретационного плана. Это, прежде всего, большой цикл работ по изуче-

нию динамики рассеянных звездных скоплений, сделанных профессором В.М. Даниловым, его соавторами и учениками. Другое новое направление, связанное с исследованиями космических молекул и процессов образования звезд и планет, как в области теории, так и наблюдений на крупнейших мировых астрономических инструментах наземного и космического базирования, с середины 1980-х возглавил А.М. Соболев. С начала 90-х в Коуровской обсерватории теоретическими исследованиями внутреннего строения и эволюции массивных звезд занимается Е.И. Старицин. Чуть позже под руководством Э.Д. Кузнецова стали проводиться исследования динамической эволюции искусственных и естественных небесных тел, включая планетные системы вокруг других звезд.

С течением времени увеличивалась и модернизировалась наблюдательная база обсерватории, а вместе с ней расширялась и тематика научных исследований. Так, в начале девяностых годов прошлого века силами сотрудников обсерватории был создан телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 70 см, оснащенный двухлучевым пятиканаль-

ным электрофотометром, спроектированным и изготовленным к.ф.-м.н. В.П. Кожевниковым. Оптика телескопа была изготовлена в оптических мастерских Крымской астрофизической обсерватории, а детали телескопа – на уральских заводах по чертежам В.П. Кожевникова. Телескоп был установлен на модернизированную монтировку немецкого типа от фабричного телескопа-рефрактора АВР-2. Управление электрофотометром, сбор данных и слежение за звездой

осуществляется автоматически по программе с компьютера. На данном телескопе с середины 90-х производятся наблюдения катаклизмических переменных звезд.

Следует отметить, что изготовление телескопа пришлось на один из труднейших периодов существования обсерватории – 1990-е годы, когда оплата труда астрономов была крайне низкой. Не раз ректорат университета предлагал временно закрыть обсерваторию из-за недостатка средств на ее содержание. Подобные проблемы в тот период испытывали и многие академические и университетские обсерватории страны.

К счастью, тогда обсерваторию возглавляла Полина Евгеньевна Захарова, чья неукротимая энергия, огромная работоспособность и неувядающий энтузиазм, проявлявшиеся как в мелочах, так и в больших, основополагающих проектах и делах, касающихся модернизации и просто дальнейшего существования обсерватории, помогли преодолеть тяжелый период без каких-либо существенных потерь. Полина Евгеньевна возглавляла обсерваторию более 35 лет, пока не была вынужде-



Телескоп рефлектор АЗТ-3 много лет был основным звездным телескопом обсерватории

на уйти на пенсию по состоянию здоровья. За время ее директорства в обсерватории появились четыре новых телескопа, в том числе и современный альт-азимутальный телескоп фирмы APM-Telescopes с диаметром зеркала 1.2 метра. Была проведена существенная модернизация камеры SBG (работа выполнена главным специалистом, к.т.н. Д.В. Гламаздой). Все телескопы были оснащены современными панорамными электронными приемниками излучения – ПЗС-камерами.

Финансирование проектов осуществлялось из средств грантов, выигранных коллективом обсерватории самостоятельно либо в кооперации с другими подразделениями университета, федеральных целевых программ. Определенная часть средств была субсидией государства на совершенствование материальной базы вновь организованного Уральского федерального университета (в результате объединения двух ведущих вузов Урала – Уральского политехнического института (Уральского государственного технического университета) и Уральского государственного университета).



Телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 70 см, оснащенный двухлучевым пятиканальным электрофотометром, спроектированным и изготовленным сотрудником Коуровской обсерватории, к.ф.-м.н. В.П. Кожевниковым.

На выделенные средства за последние 15 лет Коуровская обсерватория приобрела 4 новых телескопа, что позволило существенно расширить научную тематику проводимых исследований. Так, робот-телескоп Мастер-II-Урал, который может управляться по интернету из любой удаленной точки (например, из Екатеринбурга или Москвы), входит в обширную сеть подобных телескопов, созданную профессором Московского государственного университета доктором физ.-мат. наук В.М. Липуновым – для регистрации в оптическом диапазоне транзиентов (послесвечений) гамма-вспышек, природа которых до

конца не выяснена. Гамма-вспышки регистрируются из космоса соответствующими спутниками. Телескоп представляет собой спарку из двух небольших широкоугольных телескопов с диаметрами объективов 400 мм на автоматизированной, управляемой от компьютера монтировке.

Самый крупный и главный телескоп обсерватории – это альт-азимутальный телескоп с диаметром зеркала 1.2 метра, уже упоминавшийся выше и вступивший в строй в 2011 г. Он оснащен современным эшелле-спектрометром, собранным по схеме белого зрачка. Такая схема позволяет сделать спектрометр очень компактным с симметричным распределением световой энергии вдоль порядков спектра. Спектрометр спроектирован и изготовлен в лаборатории астроспектроскопии Специальной астрофизической обсерватории (САО РАН) под руководством профессора, доктора физ.-мат. наук В.Е. Панчука. Следует сказать, что это первый спектрометр такого типа, работающий на территории России.

Еще два телескопа-рефлектора были призваны модернизировать наблюдательную базу обсерватории. Это телескоп системы Риччи-Кретьена Российской фирмы «АстроСиб» с диаметром главного зеркала 500 мм, пришедший на смену заслуженному и старейшему телескопу обсерватории АЗТ-3, длиннофокусная и крупномасштабная оптика которого, созданная для работы с электрофотометрами в начале 60-х годов прошлого века, плохо подходила для питания небольших по размерам панорамных сенсоров ПЗС-камер. Телескоп АстроСиб установлен на управляемую от компьютера монтировку американского производства. С декабря 2018 г. на нем проводятся наблюдения переменных звезд (руководитель – ведущий научный сотрудник С.Ю. Горда). Робот-телескоп Robophot с диаметром

зеркала 600 мм в настоящее время вводится в строй. Телескоп оснащен трехканальным фотометром, реализующим фотометрическую систему SDSS.

Таким образом, в настоящее время Коуровская обсерватория по наличию действующих телескопов и качеству принимающей аппаратуры является одной из самых оснащенных среди университетских обсерваторий России. Уральский федеральный университет здесь уступает только Московскому и Казанскому университетам.

Несмотря на современную наблюдательную базу, Коуровская обсерватория, относящаяся к категории равнинных обсерваторий, конечно, не может в полной мере конкурировать с ведущими обсерваториями России и мира, расположенными высоко в горах, выше границы плотного и запыленного воздуха нижнего слоя земной атмосферы, и оснащенными существенно более крупными телескопами. Но имеется достаточно широкий круг научных задач, например, длительный мониторинг избранных объектов, которые можно успешно решать на телескопах умеренного размера, и которые никогда не будут реализованы на крупных инструментах из-за дороговизны наблюдательного времени и загруженности программами, связанными с решением задач, лежащих на переднем крае изучения Космоса. Телескопы умеренного размера также вносят большой вклад в регистрацию и исследование транзиентных явлений.

ПОДГОТОВКА КАДРОВ И НАУЧНАЯ РАБОТА

Понятно, что оснащенность обсерватории инструментами – это только половина дела. Для успешных научных результатов нужны специалисты-исследователи, которые могут поставить за-

дачи на современном уровне и решить их, используя полученные данные. Как известно, наиболее плодотворна в этом плане молодежь и проблем с кадрами у Коуровской обсерватории практически никогда не было. В настоящее время обсерватория имеет статус учебно-научной, поскольку входит в состав Института естественных наук и математики Уральского федерального университета. Многие научные сотрудники обсерватории принимают участие в образовательном процессе, читают студентам лекции, проводят лабораторные занятия и учебную практику на обсерватории. Естественно, что в результате такого взаимодействия студенты по своему желанию включаются в процесс научной работы, результатом которого являются курсовые и дипломные работы, квалификационные работы на соискание степени бакалавра и магистра, совместные научные статьи и публикации. В дальнейшем многие студенты продолжают учебу в аспирантуре и остаются работать в обсерватории. Нужно сказать, что в настоящее время все научные сотрудники обсерватории – порядка 30 человек – являются выпускниками кафедры астрономии и геодезии Уральского университета.

Сейчас, в связи с преобразованием университета в Уральский федеральный, кафедра имеет более длинное название, а именно: кафедра астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды. Но во все времена кафедра и обсерватория, еще с момента их создания К.А. Бархатовой, работали как единый коллектив.

После окончания университета наиболее талантливые студенты не только остаются в астрономической обсерватории УрФУ, но и направляются в аспирантуру в крупные научные центры, обсерватории и университеты России, такие как Институт астрономии РАН



Коллаж. 1.2 м телескоп на фоне галактики NGC1672

(ИНАСАН), СПбГУ, САО РАН, ГАИШ МГУ и др., а также в зарубежные научные центры. После нескольких лет учебы или работы там они возвращаются обратно в Россию с багажом приобретенного научного опыта и новых знаний, усиливая научный потенциал родной обсерватории или кафедры.

Научная деятельность коллектива обсерватории включает в себя различные направления астрономических исследований от изучения движений искусственных спутников Земли и тел солнечной системы до исследования солнечной активности и свойств переменных звезд различных типов, а также околозвездной и межзвездной среды, в частности источников мазерного излучения, а также процессов звездообразования. Коуровская обсерватория продолжает свои традиционные иссле-

дования и является признанным центром в области изучения рассеянных звездных скоплений (РЗС) и структуры Галактики.

Сотрудники обсерватории ежегодно участвуют в Российских и международных конференциях и семинарах, где выступают с докладами о полученных в процессе научной работы результатах. В большинстве это доклады об итогах совместной работы с коллегами из других обсерваторий или институтов России и мира. Ежегодно коллектив обсерватории публикует до двух-трех десятков статей в ведущих научных журналах за рубежом и в России, входящих в международные базы данных WoS и Scopus.

Востребованными являются и данные, получаемые в процессе наблюдений на телескопах обсерватории. Так, результаты фотометрических наблюдений звезд на 700-м телескопе, а также спектральных наблюдений на 1.2-метровом телескопе используются в совместной работе с коллегами из Крымской астрофизической обсерватории, Специальной астрофизической обсерватории РАН, Института астрономии РАН и др. Наблюдения на робототелескопе Мастер-II-Урал проводятся в автоматическом режиме совместно с другими телескопами сети Мастер, а также широко используются для проведения поисковых исследований экзопланет, наблюдений переменных звезд.

С другой стороны, при проведении исследований на современном научном уровне для решения некоторых задач «мощности» телескопов обсерватории явно недостаточно. В этом случае наблюдения проводятся на крупных телескопах других обсерваторий по заранее оформленным заявкам. Особенно это касается наблюдений в инфракрасной области и радиодиапазоне. Радиотелескопов на обсерватории нет. Несмотря на это сотрудники обсер-

ватории могут похвалиться, что лично наблюдали на крупных радиотелескопах Южной Европейской Обсерватории в Чили, Австралии, Германии, Швеции и др. Регулярно используются инструменты России – радиотелескопы в Пушчино, инфракрасный телескоп Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ и др. Чрезвычайно успешными являются исследования сотрудников обсерватории, проводимые с использованием крупнейших радиоастрономических инструментов мира, таких как радиоинтерферометры ALMA, VLBA, ATCA и др. Нужно отметить, что рекорд углового разрешения не только астрономических, но и всех научных исследований был установлен при наблюдениях водяных мегамазеров по заявке, составленной под руководством А.М. Соболева, на крупнейшем инструменте, созданном человечеством – космическом радиоинтерферометре проекта «РадиоАстрон».

В этом плане не отстают и «оптики» – это наблюдения на крупнейшем Российском телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории (САО) РАН с диаметром главного зеркала 6 метров, на телескопе с диаметром зеркала 2 метра, принадлежащем России (Институт Астрономии АН) и Украине, установленном на высоте 3 км на пике Терскол, на 2.5-метровом телескопе кисловодской горной станции ГАИШ и, наконец, на одном из 8-метровых телескопов Южной Европейской обсерватории в Чили. В последние два десятилетия Коуровская обсерватория приобрела большую популярность среди жителей Свердловской области благодаря проведению экскурсий и чтению лекций по астрономической тематике для населения, главным образом для школьников, сотрудниками обсерватории. Основную часть этой просветительской работы ведет старейший научный сотрудник обсерватории Г.В. Лямова.

КОУРОВСКАЯ ЗИМНЯЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ШКОЛА «ФИЗИКА КОСМОСА»

Кто из Российских астрономов не знает о Коуровской зимней школе? Знают о ней и студенты астрономических специальностей многих Российских вузов. Идея пригласить гостей из других институтов в зимние студенческие каникулы пришла в голову нескольким студентам-астрономам пятого курса Уральского университета в далеком 1970 г. Астрономическая школа – мероприятие, где можно рассказать друг другу о том, кто чем занимается и поделиться последними новостями в области астрономии (ведь интернета тогда не было). Местом встречи и проживания была выбрана еще совсем молодая Коуровская обсерватория, расположенная в живописной местности рядом с Коуровской турбазой (сейчас т/б «Чусовая») на берегу красивой уральской реки Чусовой. На первую школу приехало лишь несколько студентов из УрГУ МГУ и Казанского университета. Мероприятие прошло успешно и всем участникам очень понравилось. На следующий год было повторение. Вместе со студентами стали приглашать преподавателей и научных сотрудников из вузов и научных учреждений для чтения лекций по различным аспектам астрономии. Событие называли астрономической школой, поскольку студенты не только обменивались своими достижениями, но и получали совершенно новую, свежую информацию из различных областей астрономии. Вместе с получением новых знаний на лекциях в научной части школы участники также имели прекрасную возможность хорошо отдохнуть и поправить здоровье, катаясь на лыжах, взятых напрокат на турбазе. Этому

же способствовало и регулярное трехразовое питание в турбазовской столовой. Зимние астрономические школы в Коуровке стали регулярными.

В 1979 г. во время зимней школы было решено провести Всесоюзную конференцию по тематике изучения нашей Галактики. Поскольку участников ожидалось много, Уральский Научный Центр АН СССР любезно предоставил свою базу отдыха в пос. Кунгурка под г. Свердловском для проведения конференции. Несколько лет после этого зимняя астрономическая школа в Коуровской обсерватории не проводилась. Это было связано с необходимостью проведения ремонта зданий обсерватории, прослуживших уже 15 лет. Затем зимние астрономические школы проводились не только в Коуровской обсерватории, а также на турбазе Хрустальная и в доме отдыха Селен под Свердловском, в г. Челябинске на базе Челябинского университета, в г. Киеве и в г. Саранске.

С 1992 года по настоящее время зимние астрономические школы снова и регулярно проводятся в Коуровской астрономической обсерватории. Кардинально изменилась и программа мероприятия. Сейчас студенты не только слушают лекции преподавателей и научных сотрудников, но и сами выступают, участвуя в конкурсе, получая квалифицированную оценку своих докладов. Таким образом они приобретают навык выступления на научных конференциях, многие впервые в своей жизни. И самое главное, студенты имеют прекрасную возможность познакомиться и завязать научные связи с ведущими астрономами страны и поделиться в тематике своих дальнейших исследований.

Помимо научной части на школе традиционно проводится ряд мероприятий, скрашивающих долгие зимние вечера, – это вечер знакомств, где каждая делегация рассказывает и пока-

зывает интересные моменты из жизни и истории своего вуза; музыкальный вечер, на который известные уральские музыканты и студенты Уральской консерватории приезжают в обсерваторию для проведения концерта живой музыки; так называемый КВАС – Клуб Веселых Астрономов, астрономический КВН, где соревнуются две команды преподавателей и студентов.

С 2001 г. по инициативе тогдашнего директора обсерватории П.Е. Захаровой к началу каждой зимней школы выпускается иллюстрированный настенный календарь «Астрономия».

Во время проведения зимних школ студентам читали лекции ведущие астрономы нашей страны академики А.М. Черепашук – научный руководитель ГАИШ, М.Я. Маров – специалист по исследованию атмосфер планет с мировым именем, Д.Я. Мартынов – автор основных учебников по астрофизике, профессор Киевского университета К.И. Чурюмов, чьим именем названа комета, на орбиту вокруг которой впервые в истории человечества был выведен космический аппарат, член-корр. РАН Б.М. Шустов – выпускник Уральского университета, ныне научный руководитель ИНАСАН, профессор Санкт-Петербургского университета К.В. Холшевников и многие, многие другие профессора, доктора и кандидаты наук российских вузов, ведущих обсерваторий и научных центров России. Этот список можно продолжать и продолжать. Некоторые бывшие студенты-участники зимних школ в настоящее время приезжают уже в качестве преподавателей читать обзорные лекции нынешним студентам. Например, тогдашний студент МГУ, участник самой первой зимней школы Н.Н. Самусь сейчас доктор наук, сотрудник ИНАСАН или бывший студент Уральского университета Д.З. Вибе, занимавший призовые места чтением своих докладов, сейчас



Одна из первых зимних коуровских астрономических школ, 1977 год. В третьем ряду сидят: вторая слева П.Е. Захарова, К.В. Холшевников, К.А. Бархатова, М.Я. Маров, Т.В. Бордовицина; В первом ряду сидят авторы статьи, тогда еще студенты, слева А.М. Соболев, С.Ю. Горда

профессор РАН, доктор наук, сотрудник ИНАСАН, лекции которого на школе не пропускает ни один студент. К тому же он является неизменным ведущим КВАСа. Этот список также можно продолжать и продолжать.

С 90-х годов прошлого века участие в школе принимают зарубежные коллеги из Франции, Италии, Польши, Японии, Китая, а также ближнего зарубежья. Можно с полным правом сказать, что Коуровская зимняя астрономическая школа имеет статус международной. С 1994 г. она называется международной студенческой научной конференция «Физика космоса». В следующем 2022 г. планируется проведение юбилейной 50-й школы.

В 1996 г. Коуровская обсерватория получила собственный астероид – в ее честь была названа малая планета, зарегистрированная в международном

каталоге под № 4964 с именем «Коуровка». Такой подарок обсерватории сделал известный исследователь малых планет, сотрудник Крымской астрофизической обсерватории Н.С. Черных, открывший этот астероид в 1979 г., и неоднократно посещавший Коуровскую обсерваторию с чтением лекций во время проведения зимних астрономических школ. Как сказано в официальном свидетельстве о присвоении имени малой планете: «Малая планета Коуровка названа в честь астрономической обсерватории Уральского государственного университета, известной исследованиями в области звездной астрономии, астрометрии комет, астероидов и искусственных спутников Земли, а также проведением ежегодной зимней студенческой школы. Коуровка стала своего рода Меккой для российских студентов-астрономов».

АКАДЕМИК В.Е. ФОРТОВ И МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОЕКТ «Вега»

САГДЕЕВ Роальд Зиннурович,

академик РАН

Университет Мэриленда, США

ЗЕЛЁНЫЙ Лев Матвеевич,

академик РАН

ПОПЕЛЬ Сергей Игоревич,

профессор, доктор физико-математических наук

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

DOI: 10.7868/50044394821030075

29 ноября 2020 г. на 75-м году ушел из жизни академик Владимир Евгеньевич Фортвов, человек великой и трагической судьбы¹. В.Е. Фортвов – бывший

¹ В.Е. Фортвов (1946–2020) – ученый в области химической физики, теплофизики, физики плазмы, термодинамики, создатель и руководитель нового научного направления – динамической физики неидеальной плазмы, автор и соавтор более 900 опубликованных научных работ и около 30 монографий, директор Института теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН (1992–2007), директор Объединенного института высоких температур РАН (2007–2018), министр науки и технологий (1996–1998), вице-президент РАН (1996–2001), президент РАН (2013–2017), профессор по специальности «химическая физика, в том числе физика горения и взрыва», член Международного планетарного общества (1996), академик Международной академии астронавтики (2000), иностранный член многих академий наук, председатель Российского фонда фундаментальных исследований (1993–1997), председатель Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО (1998–2005), лауреат Государственной премии СССР (1988) и России (1997), полный кавалер ордена «За заслуги перед Отечеством», удостоен многих наград и премий.



Академик В.Е. Фортвов

министр российского правительства и президент РАН – тем не менее значительное время уделял и чисто научной работе. Им разработаны динамические методы генерации состояний вещества с экстремально высокими параметрами, он создал широкий спектр генераторов

ударных волн, пневматические и электродинамические ускорители, мощные лазеры, электронные и ионные пучки, с помощью которых проведены пионерские исследования в области динамической физики экстремальных давлений и температур неидеальной плазмы. Им развита общая теория построения широкодиапазонных уравнений состояния вещества, разработаны новые методы преобразования химической энергии в энергию электромагнитного излучения и электрическую энергию, исследованы процессы, происходящие при импульсном воздействии на материалы мощных потоков направленной энергии. В.Е. Фортов уделял большое внимание проблемным вопросам развития энергетики, вопросам воздействия сверхкоротких мощных лазерных импульсов на вещество и т. д.

Обстоятельства и научные интересы В.Е. Фортова складывались так, что ему довелось глубоко разбираться в самых разных областях физики, но с молодых лет его привязанность к авиации и космосу так или иначе проявлялась на всем жизненном пути. Возможно, какое-то отношение к такого рода привязанности имел его отец, военный инженер в области авиационной техники, но после окончания школы В.Е. Фортов поступил на аэромеханический факультет знаменитого Физтеха – Московского физико-технического института (МФТИ).

Его теоретические методики в области физики неидеальной плазмы с успехом применялись для изучения плазмы глубинных областей Солнца. Выведенное В.Е. Фортовым уравнение состояния солнечной плазмы обеспе-



Некоторые из книг В.Е. Фортова, в которых важное место уделено космическим исследованиям

чивало точность порядка 99% – и это для плазмы, содержащей более 90 различных сортов частиц. Анализ, проводимый в работах В.Е. Фортова, был направлен на то, чтобы изучить состав плазмы Солнца, его эволюцию, распределение параметров плазмы по глубине, выяснить причины поведения термодинамических функций, определяющих солнечную эволюцию. При этом Солнце использовалось в качестве «космической лаборатории» – своего рода «экспериментальной установки», дающей ценную высокоточную информацию о физике многокомпонентной горячей плазмы.

Значительные усилия начиная с 1990-х годов приложил Фортов к изучению нового вида состояния вещества – плазменных кристаллов и жидкостей, а также организацию работ по их исследованию как в лаборатории, так и на орбитальных станциях «Мир» и МКС (эксперимент «Плазменный кристалл»). В атомных кристаллах или



Академик В.Е. Фортов с экипажем КК «Союз ТМ-31» – первой основной экспедиции на Международную космическую станцию (31 октября 2000 г. – 6 мая 2001 г.): У. Шеперд (США), Ю.П. Гидзенко, С.К. Крикалёв. На переднем плане – вакуумная плазменная камера, доставленная на МКС для проведения космонавтами эксперимента «Плазменный кристалл»

в электронно-ионной плазме физические процессы происходят в доли микросекунды, тогда как в плазменных кристаллах они занимают невероятно много времени – 0.01 с и даже дольше. Это позволяет довольно легко наблюдать и регистрировать подобный процесс. Необходимость исследования плазменных кристаллов в условиях микрогравитации в космосе обусловлена большой массой пылевых частиц, которые задействованы в построении кристаллов, что затрудняет возможности наблюдений в условиях земной гравитации. Например, трехмерные плазменные кристаллы удалось получить именно в условиях микрогравитации в космосе. Работы В.Е. Фортова по плазменным кристаллам достаточно хорошо знакомы общественности, этой деятельности посвящены монографии, книги и статьи², выходили телевизионные передачи.

Под руководством В.Е. Фортова проведены работы по созданию научных

основ защиты космических аппаратов при реализации международного проекта «Вега» (1980–1986). В настоящей статье предполагается более подробно остановиться на чрезвычайно важном вкладе В.Е. Фортובה в этот проект, который фактически не освещался ни в научно-популярных изданиях, ни в средствах массовой информации.

ПРОЕКТ «Вега» И ПРОБЛЕМА ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В древнейшей из наук – астрономии – кометы всегда были одним из самых загадочных небесных объектов. Вид яркой кометы с «распушенными пылающими волосами», быстро перемещающейся по непонятному, но привычному для нас звездному небу, не мог не вселять в людей суеверный ужас. Появление кометы считалось дурным предзнаменованием. Знаменитый французский хирург Амбруаз Паре так описывал влияние кометы 1528 г. на людей: «Эта комета была столь ужасна и страшна и порождала в народе столь великое смятение, что некоторые умирали от одного только страха, а другие заболели».

После того, как английский астроном Эдмунд Галлей (Edmond Halley; 1656–1742) на примере кометы, ставшей впоследствии носить его имя, доказал, что

² Монографии В.Е. Фортובה: «Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе» (2009), «Физика неидеальной плазмы» (2010), «Уравнения состояния вещества от идеального газа до кварк-глюонной плазмы» (2012). Фортובה В.Е. и др. Плазменный кристалл. Космические эксперименты. М.: Физматлит, 2015. Фортובה В.Е. Эксперимент «Плазменный кристалл» на Международной космической станции. ЗИВ, 2016, № 2.

эти небесные тела движутся по тем же законам, что и планеты, они утратили свой мистический ореол и стали такими же объектами астрономических исследований, как и другие небесные тела. После появления кометы Галлея в 1759 г. стало очевидным, что она действительно периодическая, с периодом около 76 лет (ЗиВ, 1982, № 4, 5).

Развитие во второй половине XX века средств ракетно-космической техники позволило для исследования кометы Галлея во время ее очередного визита в 1986 г. использовать космические аппараты. Было важно максимально приблизиться к кометному ядру, в котором, как в капсуле времени, должно сохраниться в первозданном виде протопланетное вещество тех далеких эпох, когда только зарождались Солнечная система, планеты, жизнь. В то же время поверхности комет подвергались сильным изменениям, наблюдая которые можно было получить дополнительную информацию об эволюции Солнечной системы (ЗиВ, 1987, № 2).

В СССР в это время осуществлялись успешные разработки автоматических межпланетных станций серии «Венера» для полетов к Венере. Интерес к изучению кометы Галлея привел к возникновению идеи о совмещении полета космических аппаратов к Венере с пролетом вблизи кометы Галлея. На этой основе в 1980 г. были разработаны основные положения по изменению проекта «Венера», и осенью этого же года принято решение о его переориентации в проект «Венера-Галлей», то есть «Вега». Ведущая роль в разработке миссии «Вега» принадлежала Институту космических исследований АН СССР (ЗиВ, 1985, № 1). В создании научных приборов и обслуживающих их систем участвовали ученые девяти стран: СССР, Австрии, Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Франции, ФРГ и



Комета 1528 г. на гравюре того времени. Она, угрожающая бедствиями и войнами (мечи, стрелы, отрубленные головы), представляется в виде меча среди дождя метеоритов, летящих по небу

Чехословакии. В этом проекте также принимали участие Европейское космическое агентство (ESA), Япония, США. В СССР созданием научного комплекса проекта «Вега» занимался ряд научных учреждений и ученых, 12 человек были награждены в 1986 г. Госпремией СССР.

Космические исследования кометы Галлея разрабатывались не только в СССР. В Европейском космическом агентстве решили создать для исследования кометы Галлея космический аппарат, названный «Джотто» в честь итальянского художника Джотто ди Бондоне, давшего миру первый «документальный» портрет возвратившейся в 1301 г. к Солнцу кометы и запечатленной на фреске «Поклонение волхвов» (около 1305 г.). Европейский аппарат «Джотто» (запущен 2 июля 1985 г.) выполнил исследования кометы Галлея



Фреска Джотто «Поклонение волхвов». Около 1305 г. Комета Галлея изображена вверху картины.
АМС «Джотто» пролетает около кометы Галлея. Рисунок ESA

во время пролета 14 марта 1986 г. около ее ядра на расстоянии 596 км. Согласно японскому проекту, состоялся последовательный запуск в 1985 г. двух аппаратов: Suisei и Sakigaki.

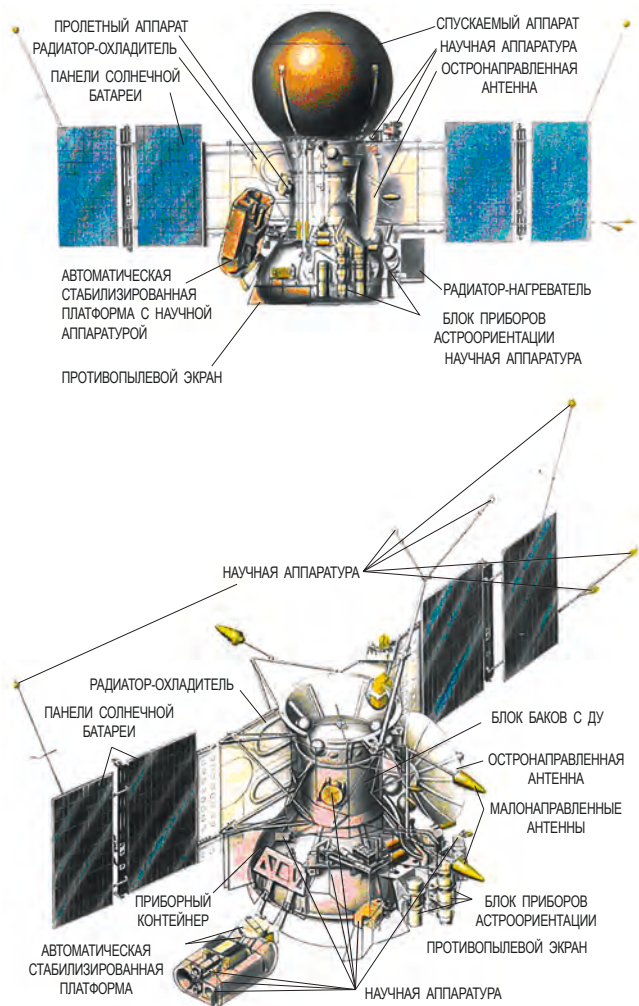
Ожидалось, что по мере сближения с ядром кометы Галлея космический аппарат «Вега» должен подвергаться усиленной бомбардировке частицами пыли и мельчайших частиц, уносимых испаряющейся оболочкой «грязного льда» кометы (ЗиВ, 1986, № 4). Встречная орбитальная динамика АМС «Вега» и кометы давала относительную скорость около 80 км/с. При такой скорости столкновение с частицей в 1 г сопровождалось бы выделением энергии, эквивалентной взрыву в 1 кг тринитротолуола (ТНТ). Ожидаемый спектр масс налетающих частиц (по моделям на основе астрономических наблюдений комет) показывал, что при приближении к ядру кометы до расстояний в несколько тысяч километров становится заметной вероятность столкновений с эквивалентом вплоть до десятков граммов ТНТ. В любом случае мгновенное кратковременное значение пика давления в момент удара составляло бы десятки мегабаров. Результатом могла бы стать разгерметизация приборного

отсека космического аппарата, отвечающего за работоспособность бортовых служебных систем, в их числе управления и телекоммуникаций. В частности, в связи и с этим обстоятельством разработчики космического аппарата и специалисты Института прикладной математики АН СССР (по выбору траектории полета) настаивали на пролете не ближе 100 тыс. км. Если бы был принят такой сценарий, то советские исследования кометы Галлея оказались бы на вторых ролях, вместе с японским проектом, в рамках которого к комете приближался лишь один из космических аппаратов, да и то вплоть до расстояния только 150 тыс. и около 7 млн км. Вот почему проблема защиты космического аппарата «Вега» приобрела такое важное значение.

ИКИ АН СССР сразу же обратился к двум крупнейшим специалистам по экстремальному состоянию вещества: докторам физико-математических наук Е.Н. Аврорину (зам. директора по науке НИИ-1011, ныне – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, РФЯЦ-ВНИИТФ) и В.Е. Фортову (Институт химической физики АН СССР). Прямую рекоменда-

цию В.Е. Фортову дал его руководитель академик Н.Н. Семёнов. Это сотрудничество оказалось необычайно плодотворным. Специалисты под руководством Е.Н. Аврорина в Снежинске (Челябинская обл.) и замечательный тандем В.Е. Фортков – С.И. Анисимов (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау) в Черногловке построили модель высокоскоростного удара частиц, предложили схему защиты с помощью противопылевого экрана («фальшэкрана») из тонкого слоя алюминия и тем самым внесли важный вклад в создание защиты от пылевых частиц кометы Галлея космических аппаратов «Вега-1» и «Вега-2»³.

Для оценки параметров противопылевой защиты АМС «Вега» необходимо было иметь детальную информацию о характере и размерах ударных разрушений в широком диапазоне скоростей соударения. Однако такого рода информация имела лишь для скоростей, не превышающих ~ 20 км/с. При приближении к этой границе резко возрастают трудности контроля фазового состава, плотности



Схемы устройства АМС «Вега» с указанием расположения противопылевого экрана («фальшэкрана»), ее систем и приборов. Рисунки НПО им. С.А. Лавочкина

³ «Вега-1» и «Вега-2» стартовали 15 и 21 декабря 1984 г. 9 и 13 июня 1985 г. от станций были отделены спускаемые аппараты, которые 11 и 15 июня доставили на Венеру посадочные аппараты и аэростатные зонды. 6 и 9 марта 1986 г. станции пролетели на расстоянии 8890 и 8030 км от ядра кометы Галлея, выполнив программу научных исследований (ЗиВ, 1986, № 5; 2016, № 2).

и температуры ударника. Наиболее интересная для космических исследований и ряда других приложений область скоростей соударения 20–100 км/с. До сих пор она остается недоступной для прямых экспериментов ввиду отсутствия подходящих методов безнагревного неразрушающего ускорения макрочастиц в конденсированном состоянии.

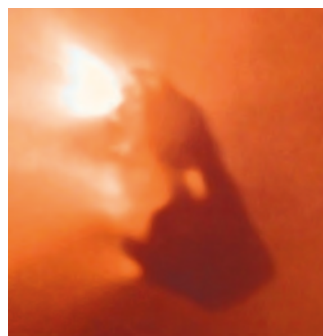


Схема строения ядра кометы Галлея по данным АМС «Вега» и «Джотто». Изображение ядра, на котором виден выброс материала с его поверхности в результате нагрева. Снимок сделан 14 марта 1986 г. АМС «Джотто». ESA

Плотности энергии, соответствующие скоростям удара 80–100 км/с, удастся получить при воздействии на конденсированное вещество лазерного излучения (или потоков заряженных частиц) большой мощности. В таких экспериментах возникает, однако, нетривиальная задача определения параметров лазерного импульса, вызывающего те же разрушения, что и удар твердой частицы с заданными массой, плотностью и скоростью. Решение этой задачи требует сложных численных расчетов. Кроме того, лазерное моделирование, как правило, является вполне адекватным для описания ударного воздействия пылевой частицы в области распространения ударной волны, причем лишь вне пятна облучения, в которое фокусируется греющий импульс излучения.

При рассмотрении вопроса о параметрах противопылевой защиты АМС «Вега» для оценки разрушений, производимых ударом пылевых частиц, использовались экстраполированные в область высоких скоростей

экспериментальные данные и расчетные результаты, полученные в рамках упрощенных физических моделей. Из-за невозможности прямых количественных экспериментов в интервале скоростей вблизи 80–100 км/с единственным способом получения более точных сведений о высокоскоростном пробивании могли служить численные расчеты. Они должны были быть основаны на достаточно полной и близкой к реальной физической модели, построенной с учетом всей доступной информации о термодинамических, прочностных и реологических свойствах материалов защитных экранов в диапазоне давлений десятки Мбар (тысячи ГПа) при ультракоротких соударениях макрочастиц. Построение такой модели и сами численные расчеты сопряжены с весьма серьезными трудностями.

Прежде всего необходима была информация об уравнении состояния вещества в обширной области фазовой диаграммы от сильно сжатого и разогретого конденсированного состояния

с давлениями $p \sim 50$ Мбар и температурами $T \sim 10^6$ К до газовой фазы с практически нулевыми давлением и температурой. Моделирование ударов пылевых частиц для условий пролета АМС «Вега» сквозь большую кому кометы Галлея (ЗиВ, 1986, № 5) требовало уравнения состояния, охватывающего диапазон, составляющий семь порядков величины по плотности и четыре порядка по температуре. Далее нужна была адекватная модель разрушения материала под действием механических напряжений, правильно описывающая процесс дробления среды и образования отколовшихся фрагментов частиц. Наконец, необходим был численный метод, позволяющий рассчитывать течения сплошной среды с большими деформациями и значительными изменениями пространственного масштаба. В.Е. Фортову и его команде удалось построить физическую модель, с достаточной полнотой описывающую все стадии ударного разрушения, и выполнить численные расчеты поврежденного аппарата «Вега».

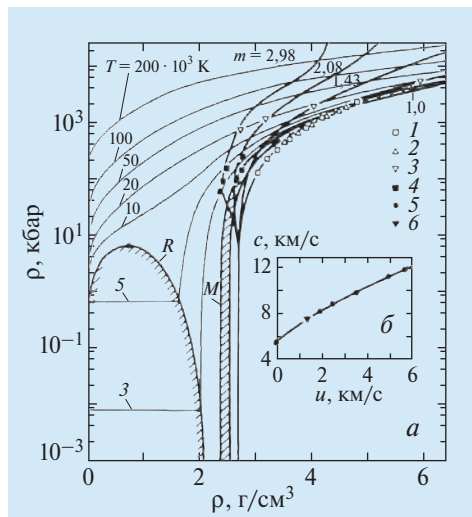
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

При высокоскоростном ударе материал противопылевого экрана сначала сжимается в ударной волне, а затем расширяется в идущих от свободных границ волнах разгрузки. Термодинамическое состояние вещества изменяется при этом в очень широких пределах. Для гидродинамического расчета удара необходимо уравнение состояния, справедливое во всей области изменения параметров вещества и правильно описывающее высокотемпературные фазовые переходы. Существовавшие в начале 1980-х годов теоретические методы расчета термодинамических свойств веществ были применимы в узких областях параметров для конкретного

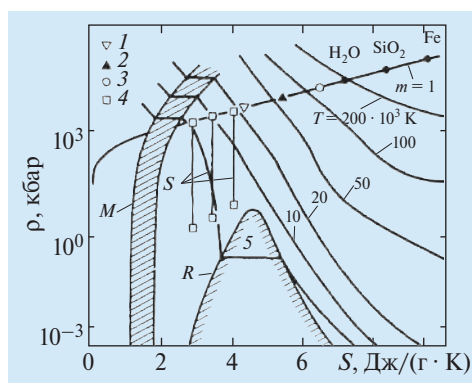
фазового состояния и фактически не могли быть использованы для проведения необходимых в данном случае сквозных гидродинамических расчетов во всей области фазовой диаграммы.

Альтернативный подход состоял в конструировании полуэмпирической модели, в которой общий вид функциональных зависимостей термодинамических потенциалов устанавливался на основе теоретических соображений, а для определения значений коэффициентов в этих зависимостях использовались экспериментальные данные. Такой подход позволил В.Е. Фортову максимально использовать имеющуюся экспериментальную и расчетную информацию и дал возможность построить уравнение состояния в форме, удобной для проведения численных расчетов. Общая процедура построения полуэмпирических уравнений состояния основана на представлении свободной энергии в виде суммы членов, описывающих вклады электронов и решетки. При этом следует корректно учесть эффекты плавления, вклад электронов проводимости и распространить термодинамическое описание на всю практически важную область фазовой диаграммы. Использование наряду с этим всего известного набора экспериментальных и теоретических данных обеспечивает высокую точность термодинамического описания.

В экспериментах исследовалась фазовая диаграмма алюминия, на которой нанесены ударные адиабаты образцов с различной начальной пористостью. Это относилось, в частности, к данным о скорости звука в сжатых ударной волной образцах и к положению кривой плавления. Сравнение с экспериментами по повторному ударному сжатию и адиабатическому расширению ударно-сжатого алюминия показывает, что построенное уравнение состояния имеет высокую



Фазовая диаграмма алюминия в переменных давления (p) и плотности (ρ): T – изотермы, m – ударные адиабаты при различной пористости, M – область плавления, R – кривая равновесия жидкость–пар. Экспериментальные данные обозначены точками 1–6. Во врезке (б) помещен график скорости звука на ударной адиабате. На рисунке показана ударная адиабата алюминия, на которой точками отмечены начальные состояния, реализующиеся при ударе частиц из различных материалов со скоростью 80 км/с. Точность описания экспериментальных данных в традиционной области ударно-волновых исследований ($p < 5$ Мбар) достаточно высока



Фазовая диаграмма алюминия в переменных давления (p) и энтропии S (точки – состояния алюминия, возникающие после удара частиц из различных материалов): M – область плавления, R – кривая равновесия жидкость–пар. Экспериментальные данные представлены точками 1–4

точность в областях фазовой диаграммы, удаленных от ударной адиабаты. Такое представление наиболее удобно для определения равновесного фазового состава изоэнтропически (тепловой процесс, происходящий при постоянной энтропии) расширяющихся продуктов разрушения.

Особое внимание при определении коэффициентов уравнения состояния уделялось правильному описанию немногочисленных тогда опытов по получению сверхвысоких давлений в алюминии. Эта область очень важна для моделирования удара со скоростями порядка 100 км/с. По различным моделям результаты экспериментов сверялись с расчетами. В отличие от модели Томаса–Ферми (квантово-механическая теория электронной структуры системы многих тел и, в частности, оболочечной структуры атомов) уравнение состояния, полученное В.Е. Фортовым, правильно описывает весь набор экспериментальных данных об абсолютных измерениях сжимаемости алюминия при сверхвысоких давлениях.

Таким образом, В.Е. Фортову удалось получить уравнение состояния алюминия, которое хорошо воспроизводило всю совокупность разнородных статических и динамических экспериментальных данных в широкой области фазовой диаграммы. Включение в численные газодинамические расчеты реального уравнения состояния позволило существенным образом повысить достоверность результатов численного

моделирования процесса высокоскоростного удара⁴.

Процесс разрушения материала и возникающих при этом течений, которые вызваны высокоскоростным ударом частицы, имеет некоторые особенности, делающие его численный расчет нетривиальной задачей. Отметим прежде всего, что пространственный масштаб задачи при этом изменяется со временем в очень широких пределах. Другой особенностью задачи, проявляющейся в основном на начальной стадии удара, является существенная пространственная неоднородность.

На всех этапах расчета для материала противопылевого экрана для АМС «Вега» использовалось полуэмпирическое уравнение состояния, описанное выше. Уравнение состояния для налетающей частицы, химический состав которой точно не известен, в большинстве вариантов ради простоты принималось аналогичным уравнению состояния алюминия. Расчеты для нескольких вариантов с использованием других уравнений состояния показали, что параметры отверстий, кратеров и плазменных струй практически

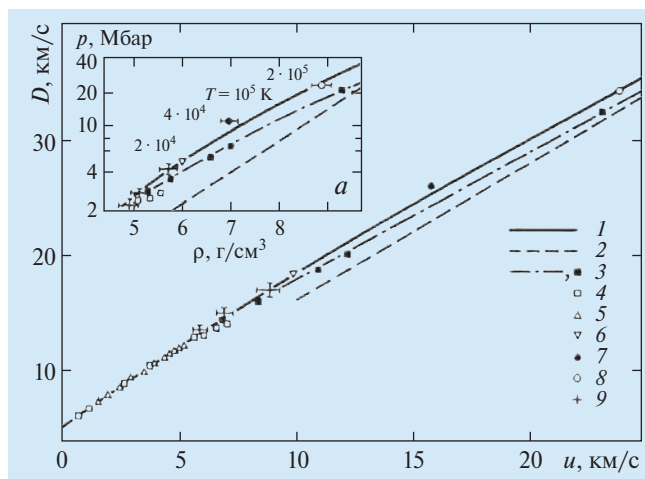
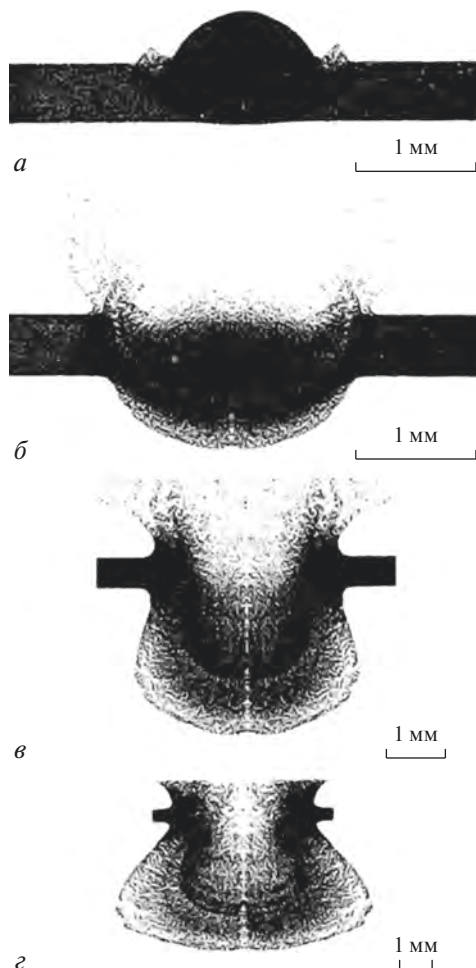


График ударной адиабаты алюминия при сверхвысоких давлениях, соответствующей данным расчетов по уравнению состояния, полученного В.Е. Фортковым (1); расчетам по модели Томаса–Ферми (2). Во врезке (a) помещен график в переменных давления p и плотности ρ . Данные (3) соответствуют интерпретации сравнительных экспериментов по сжимаемости алюминия и кварцита. Экспериментальные данные представлены точками 4–9. Сравнение экспериментальных результатов с расчетами по различным моделям показывает наилучшее совпадение данных экспериментов с результатами, полученными в рамках модели В.Е. Фортова

не зависят от того, каким уравнением состояния описывается вещество пылевой частицы. Это вполне понятно, поскольку масса участвующего в движении вещества экрана при рассматриваемых скоростях удара всегда намного больше массы первичной частицы.

Исследовалась общая картина разрушения материала экрана, вызванного ударом частицы массой 1 мг и плотностью 1 г/см^3 , летящей со скоростью 80 км/с и направленной перпендикулярно к плоскости экрана из алюминия толщиной 0.5 мм. Из экспериментов стало понятно, что толщина противопылевого экрана толщиной всего 0.5 мм оказывается достаточной для полного испарения пылевой частицы массой 1 мг. Расчеты показывают,

⁴ Агурейкин В.А., Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Карягин В.П., Константинов А.Б., Крюков Б.П., Минин В.Ф., Разоренов С.В., Сагдеев Р.З., Сугак С.Г., Фортков В.Е. Теплофизические и газодинамические проблемы противометеоритной защиты космического аппарата «Вега» // Теплофизика высоких температур. 1984. Т. 22. № 5. С. 964–983.



Последовательные фазы начальной стадии пробивания алюминиевого экрана пылевой частицей в моменты времени $t = 10$ нс (а), 20 нс (б), 50 нс (в), 100 нс (г). Показана общая картина разрушения, вызванного ударом частицы массой 1 мг и плотностью 1 г/см³ по алюминиевому экрану толщиной 0.5 мм. Плотность черных точек соответствует распределению плотности вещества в плоскости симметрии течения. Хорошо видны ударные волны, распространяющиеся по экрану и по налетающей частице: а – частица врезается в экран, б – момент времени, когда пробивание закончено и происходит формирование плазменной струи, в, г – сформировавшаяся центральная часть струи с углом расходимости $\sim 80^\circ$

что частица массой 100 мг также полностью испаряется при столкновении с экраном такой толщины. Поскольку, как полагали (что впоследствии вполне оправдалось), в окрестности кометы Галлея во время пролета около нее АМС «Вега» удары частиц массой ~ 1 мг представляли собой достаточно редкие события, основная часть разрушения противопылевого экрана должна происходить от частиц, масса которых близка к пределу пробивания. Из проведенных расчетов следовало, что при плотности частицы 1 г/см³ и скорости 80 км/с максимальная толщина пробиваемого алюминиевого экрана равна $\delta^* \approx 11d$, где d – диаметр частицы. Отсюда следует, что для защитного экрана толщиной 0.5 мм основное разрушение должно быть связано с частицами с массой порядка 10^{-7} г. Для этого интервала масс были проведены наиболее подробные расчеты всей картины разрушения.

В результате исследования картины разрушения после удара по алюминиевому экрану пылевой частицей массой $6 \cdot 10^{-7}$ г оказалось, что тыльная поверхность экрана заметно деформирована. На передней поверхности по периметру возникающего отверстия имеется острый «валик» сильно деформированного материала, имеющий тенденцию к закручиванию наружу. Эта особенность хорошо известна из экспериментов и проявляется также и при меньших скоростях соударения. Развитие разрушения во времени для этого варианта расчета показывает, что первый очаг механического разрушения зарождается вблизи передней поверхности экрана на границе растущего кратера. Несколько позже формируется и начинает быстро расти второй очаг, расположенный на оси симметрии вблизи тыльной поверхности экрана. Этот очаг и образует зону разрушения при отколе фрагментов экрана.

Ввиду большой пластичности алюминия откалывающаяся пластина испытывает до момента отрыва значительную деформацию.

Чтобы оценить эффективность противопылевой защиты, важна информация о размерах отверстий, пробиваемых пылевыми частицами в экране. Оказалось, что отверстия имеют сложную форму и не могут быть описаны при задании единственного диаметра. В интервале масс, где существенны откалывания частиц материала экрана, входной диаметр отверстия несколько меньше выходного. Отверстия в экране, пробиваемые частицами различной массы, могут быть различной формы, на передней стороне экрана по периметру они образуют характерный острый «валик».

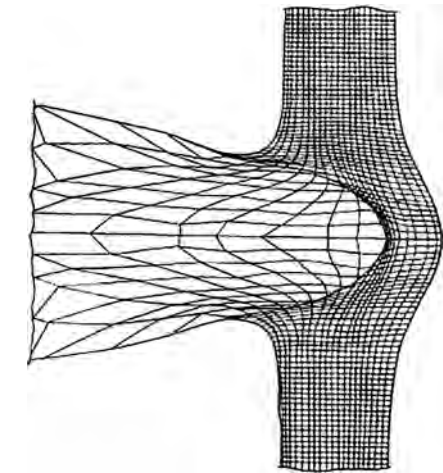
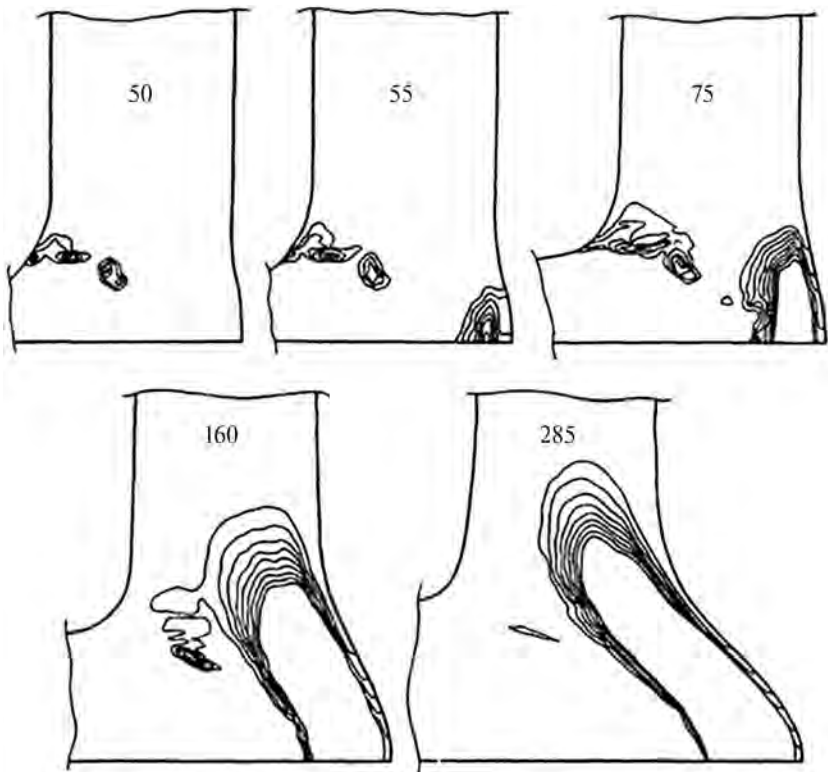
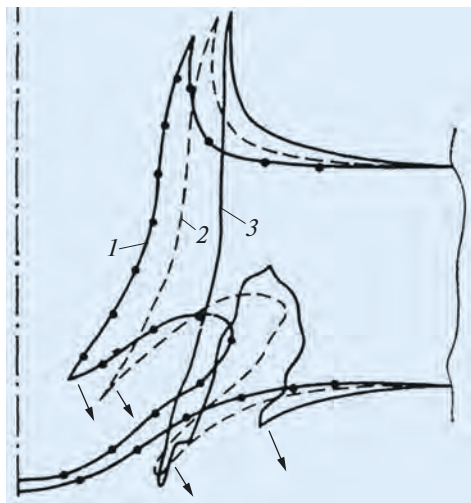


Рисунок с формой поля разрушения в экране через 170 нс после удара пылевой частицы ($\rho = 1 \text{ г/см}^3$, $m = 6 \cdot 10^{-7} \text{ г}$). Видно, как прогибается экран под воздействием удара частицы



Результаты расчетов динамики развития разрушения противопылевого экрана от ударов пылевых частиц. Указано время от момента соударения, в нс



Сечения отверстий в экране, пробиваемых пылевыми частицами с массами 10^{-7} г (1), $6 \cdot 10^{-7}$ г (2), $3 \cdot 10^{-6}$ г (3). В случае 1 образование сквозного отверстия не завершено. Стрелками показано направление движения отдельных участков тыльной поверхности, пунктирной линией – сечение экрана плоскостью, проходящей через ось отверстия. Отверстия, пробиваемые частицами различной массы, не обнаруживают геометрического подобия. На передней стороне экрана по периметру отверстия образуется характерный острый «валик»

Для пылевых частиц, масса которых не очень далека от предела пробивания экрана, воздействие плазменной струи на космический аппарат незначительно, и основную опасность представляют отколовшиеся от экрана фрагменты материала. Используемая модель позволила оценить их массы и скорости. Предельная скорость таких фрагментов составляет 1–1.5 км/с при характерной толщине экрана около 25 мкм. Характерные глубины кратеров, образуемых фрагментами, находятся в диапазоне от 0.15 до 0.25 мм. В результате исследований пришли к заключению, что толщина стенки противопылевого экрана порядка 1 мм достаточна для защиты конструкции аппарата от ударов частиц.

РЕГИСТРАЦИЯ УДАРОВ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В КОМЕ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ

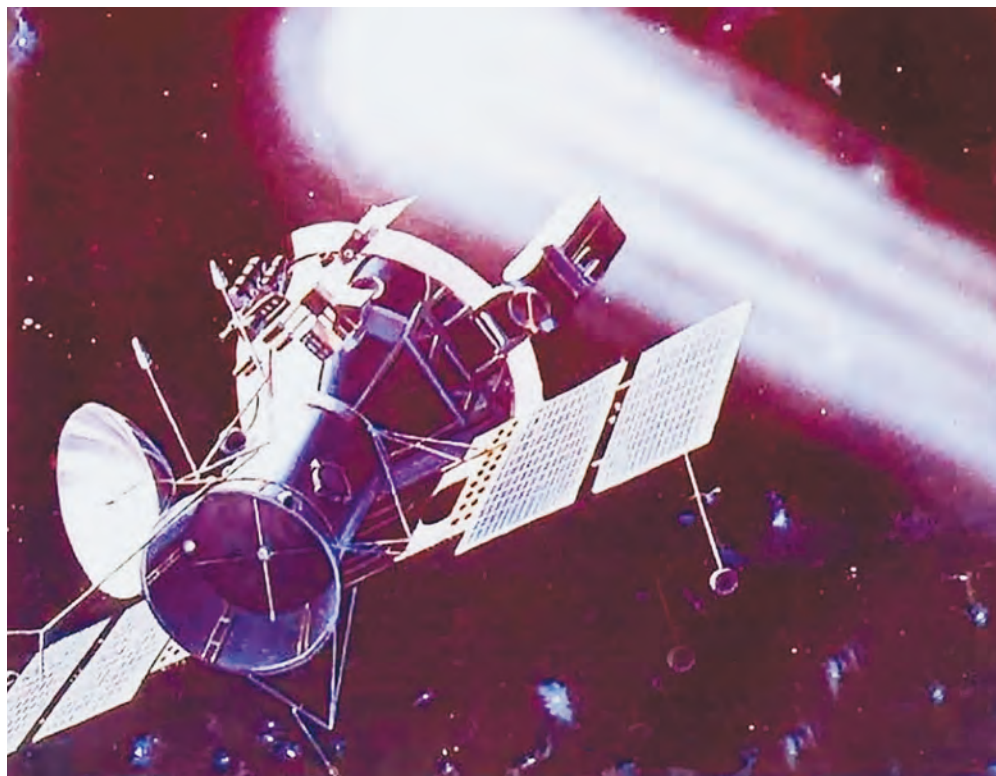
Помимо важной роли в определении противопылевой защиты космического аппарата «Вега» В.Е. Фортов предложил и реализовал в научной программе «Вега» весьма оригинальный метод

регистрации ударов пылевых частиц с помощью фотодетектора «Фотон», реагирующего на солнечный свет через каждое новое отверстие в результате удара⁵.

В марте 1986 г. во время пролета АМС «Вега-1» и «Вега-2» около ядра кометы Галлея станции подверглись сильному воздействию пылевых частиц при скорости столкновения ~ 78 км/с. Прибором «Фотон», установленным на станциях, регистрировались сравнительно крупные частицы пыли кометы массой более 10^{-9} г, также изучались их взаимодействия с элементами противопылевой защиты космического аппарата.

Прибор «Фотон» представлял собой приемную камеру с тонким никелевым экраном, содержащую оптический и акустический датчики и электронный

⁵ Эксперимент «Фотон» на межпланетных станциях «Вега» / Препринт. М.: МАИ, 1987. Анисимов С.И., Карягин В.П., Кудряшов В.А., Осипьян Ю.А., Рыжов Ю.А., Свищевский С.Б., Струков А.З., Тертерашвили А.В., Фортвов В.Е. Регистрация пылевых частиц в коме кометы Галлея с помощью прибора «Фотон» // Письма в ЖЭТФ, 25 ноября 1986 г. Т. 44, вып. 10. С. 477–480.



АМС «Вега» пролетает около кометы Галлея. Рисунок

блок для обработки и передачи сигналов в телеметрию аппарата. Частицы пыли падали на экран под углом 60° к его поверхности.

Диагностирование пылевых частиц было основано на оптическом методе измерения площади отверстий, пробиваемых частицами в экране. Для этого определялся поток солнечного излучения, попадавший через эти отверстия на фотометрическую систему прибора. Для более полной и надежной информации о свойствах частиц пыли и процессе разрушения защитного экрана при высокоскоростном ударе прибором измерялись также амплитуда и длительность световой вспышки, возникающей в момент пробивания мишени толщиной 0.1 мм, а также механический импульс, передаваемый экрану.

Калибровка прибора производилась на основе как прямых измерений, так и с использованием результатов лазерного моделирования высокоскоростного удара и численных расчетов взаимодействия пылевых частиц с экраном.

Основные выводы, которые удалось сделать на основе исследования статистики ударов пылевых частиц с помощью фотодетектора «Фотон», следующие:

- средняя концентрация частиц в пылевой атмосфере кометы, как правило, убывает с расстоянием от ядра кометы обратно пропорционально квадрату расстояния;

- в окрестности точки максимального сближения космического аппарата с ядром кометы наблюдалась область повышенной концентрации пы-

левых частиц, вероятно, обусловленной интенсивными выбросами пыли и газа с поверхности ядра («джетами»), зарегистрированными и другими приборами;

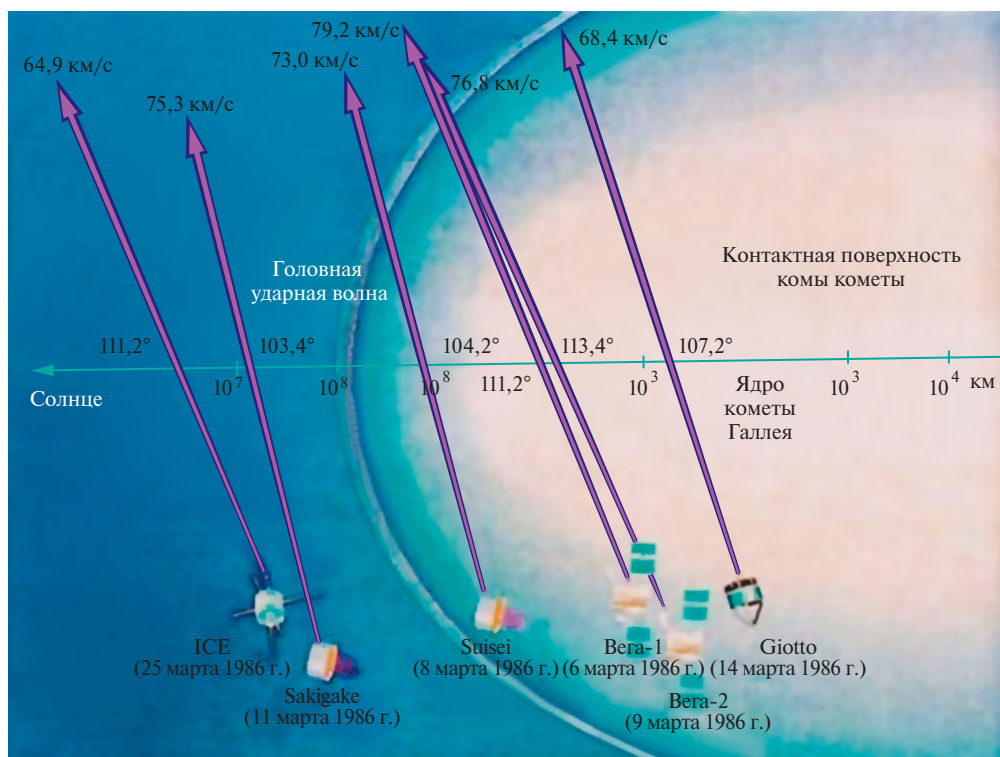
– найдено распределение пылевых частиц по массам, имеющее степенной характер ($\sim m^{-\alpha}$), а также определен показатель степени ($\alpha \approx 0.58$), характеризующий это распределение. Оказалось, что этот показатель степени заметно отличается от следующего из астрономических наблюдений значения ($\alpha \approx 1$). Причину расхождения можно понять, если иметь в виду, что промежуток времени между испусканием пылевой частицы и ее регистрацией соизмерим в эксперименте «Вега» с характерным временем изменения активности кометы (после прохождения

кометой перигелия ее активность падает со временем). Поскольку тяжелые частицы движутся медленнее и больше запаздывают, наблюдаемое в эксперименте распределение должно обнаруживать избыток тяжелых частиц, что и проявляется в уменьшении значения эффективного показателя α ;

– установлено, что полная масса пыли, производимой ядром кометы в секунду, вероятно, не превышает 10 т.

ВКЛАД УЧЕНОГО В КОСМОНАВИКУ

Академик В.Е. Фортов сделал многое для космонавтики, ему довелось сыграть одну из ключевых ролей в проекте



Траектории пролета пяти космических аппаратов, получивших неофициальное название «Армада Галлея», около кометы Галлея в марте 1986 г. Указаны относительные скорости космических аппаратов и ядра кометы

«Вега», позволившем провести успешное исследование кометы Галлея АМС «Вега-1» и «Вега-2». По решаемым задачам, схеме полета, конструкции, составу бортовых систем и научной аппаратуры обе межпланетные станции были полностью идентичны. Запуск двух одинаковых аппаратов имел целью не только повышение общей надежности выполнения экспедиционной задачи, но и изучение кометы Галлея при различном удалении ее от Солнца. В значительной степени именно благодаря вкладу В.Е. Фортова в конструкцию противопылевой защиты этих аппаратов и создание «фальш-экрана» оказалось возможным сближение с ядром кометы аппарата «Вега-1» на расстояние 8890 км 6 марта 1986 г., а через три дня «Вега-2» на расстояние 8030 км. Если бы не было исследований В.Е. Фортова, кратко описанных в настоящей статье, пролет космических аппаратов оказался бы возможным на расстояниях не ближе 100 тыс. км. Столь близкий пролет космических аппаратов от ядра кометы Галлея дал возможность изучения внутренних областей кометы Галлея, в том числе ее ядра. Кроме того, удалось обнаружить в коме (газовой оболочке кометы) воду, двуокись углерода, аммиак, гидроксильные и цианистые радикалы, а также различные продукты фотодиссоциации углеводородов и другие органические вещества.

Изображения ядра кометы были получены впервые в истории. По изображениям были определены размеры ядра, период вращения и примерная ориентация оси вращения, отражательная способность поверхности, характеристики выбросов пыли и т.д. Теперь проект «Вега» уверенно можно назвать наиболее успешным отечественным научным проектом в исследовании тел Солнечной системы с начала космической эры.



Изображение кометы Галлея, полученное с расстояния около 8 тыс. км АМС «Вега-2». Мощные пылевые выбросы несколько маскируют поверхность ядра, но детальная фотометрическая обработка позволила определить его формы, размеры, отражательную способность. По данным ИКИ АН СССР

И другие достижения В.Е. Фортова в области космических исследований являются весьма важными и примечательными. Так, многочисленные результаты эксперимента «Плазменный кристалл» остаются по сей день одними из наиболее значимых, полученных за годы эксплуатации российского орбитального комплекса «Мир» и Международной космической станции. В последние годы В.Е. Фортов проявлял неподдельный интерес к будущим российским лунным миссиям «Луна-25», «Луна-26», «Луна-27» и др. Ученый участвовал в работах по исследованиям пылевой плазмы у Луны, выдвинул идею проведения активного эксперимента на ее поверхности, который позволил бы добиться формирования таких параметров пылевой плазмы у лунной поверхности, что возможной оказалась бы реализация плазменно-пылевого кристалла. К сожалению, не все замыслы он успел реализовать.

ПИОНЕРЫ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ.

Документы личного фонда Ф.А. Цандера в Архиве РАН

СЕЛИВАНОВА Ольга Владимировна,

кандидат исторических наук,

Архив РАН

DOI: 10.7868/50044394821030087

«Сначала неизбежно идут: мысль, фантазия, сказка. За ними шествует научный расчет, и уже в конце концов исполнение венчает мысль»

К.Э. Циолковский

Важное место в истории отечественной теории межпланетных полетов и развитии летательных аппаратов занимает Фридрих Артурович Цандер, популяризатор идеи межпланетных полетов¹. Он одним из первых начал рассматривать идею полета в космос как инженерную задачу, разрабатывая такие вопросы, как выбор траекторий межпланетных перелетов с минимальным расходом топлива, время пребывания космических кораблей в пути, вопросы коррекции их траекторий для обеспечения безопасного движения в космосе и спуска на планету, расчеты температур стенок камер сгорания. При его непосредственном участии была создана знаменитая ГИРД (Группа изучения реактивного движения; ЗиВ,



Портрет Ф.А. Цандера. [1913 г.] АРАН. Ф. 573. Оп. 2. Д. 17. Л. 7

¹ Ф.А. Цандер считается одним из прототипов инженера Мстислава Сергеевича Лося из романа Алексея Толстого «Аэлита» (1923), построившего ракету на Марс. В романе А.Р. Беляева «Прыжок в ничто» (1933) один из главных героев – Лео Цандер, немецкий инженер-ракетостроитель.

1981, № 5) – предтеча всей отечественной ракетной промышленности.

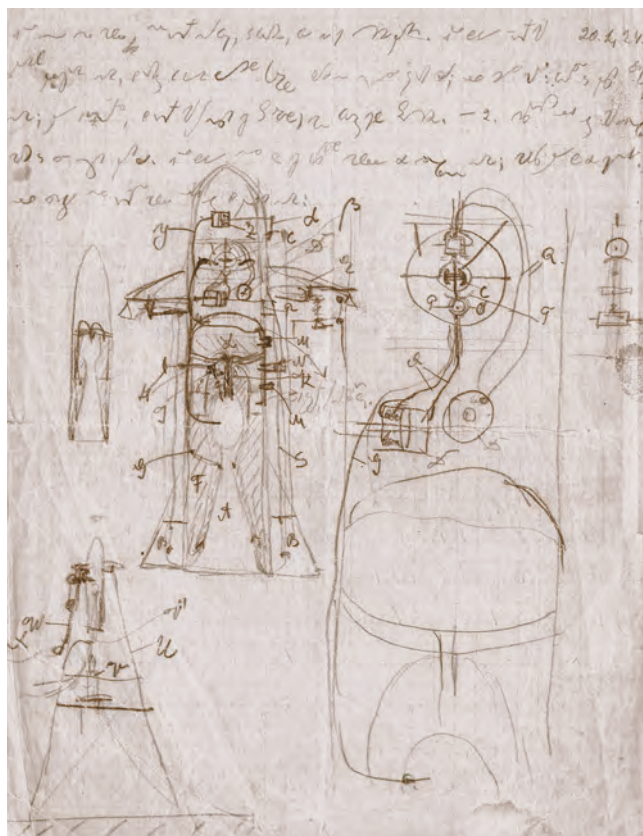
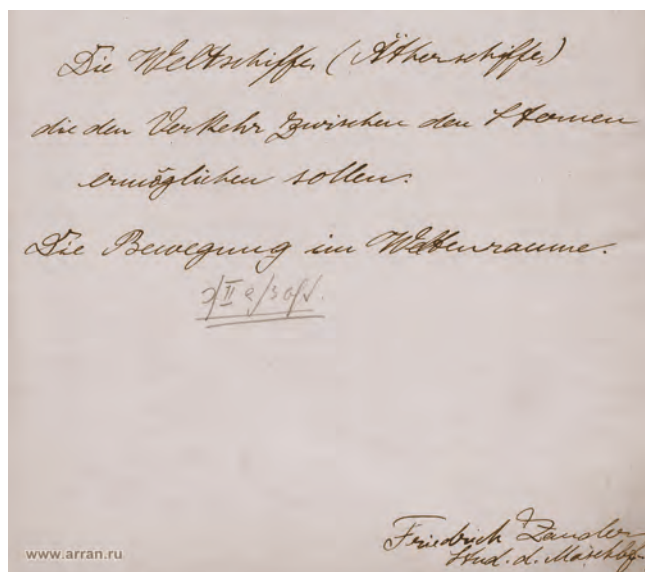
После смерти Ф.А. Цандера его архив был собран в ГИРДе, затем обрабатывался в РНИИ; в 1940 г. был передан в Архив АН. Опубликованных работ Ф.А. Цандера не много, но он оставил

Продолжение статьи ЗиВ №1, 2021, стр. 101–109.

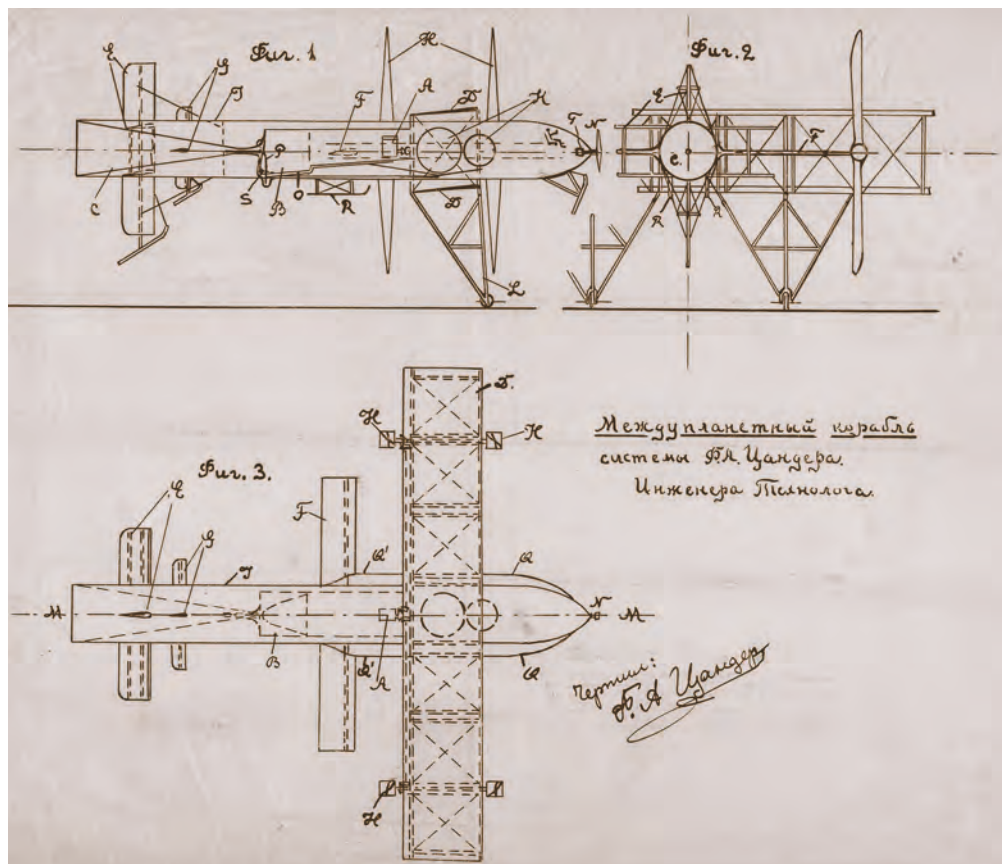
Первый лист тетради
Ф.А. Цандера «Космические
корабли (эфирные корабли),
которые должны обеспечить
сообщение между звездами.
Движение в мировом
пространстве». [1908 г.].
АРАН. Ф. 573. Оп. 1. Д. 6. Л. 1

большое количество руко-
писей. Однако сложность
в том, что значительная
часть его архива (рабо-
чие тетради и дневники) –
это стенографические за-
писи по системе Фран-
ца Габельсбергера (сейчас
устаревшей) на немецком
языке, и далеко не все они
расшифрованы и, соответ-
ственно, не опубликованы.

Опись № 1 представ-
лена научными трудами
Ф.А. Цандера. Первая по
времени написания сохра-
нившаяся в АРАН его руко-
пись – тетрадь с расчетами
«Все виды экспериментов
и расчетов. Мои первые по-
добные черновые тетради»
(1904). В этой же описи –
студенческие работы, на-
писанные во время учебы
в Рижском политехниче-
ском институте («Расчеты
к деталям машин. Расчет
вала паровой машины»,
«Проектирование паровых
машин. Расчеты к проек-
ту вертикальной машины
Votround без охлажде-
ния с перегретым паром»).
Здесь же находятся тетради
с различными расче-
тами, «Астрономический
дневник» (1909–1924) с за-
писями наблюдений не-
бесных явлений (кометы,



Эскиз Ф.А. Цандера крылатой ракеты. 1924 г. АРАН. Ф. 573.
Оп. 1. Д. 60. Л. 2 об.



Чертеж изобретения Ф.А. Цандера «Межпланетный корабль системы Ф.А. Цандера». 1923 г.
АРАН. Ф. 573. Оп. 1. Д. 41. Л. 17

небесные тела, Солнце с пятнами на его поверхности, Юпитер и др.), эскиз и описание подзорной трубы, газетные вырезки, графики и фото, связанные с астрономическими наблюдениями, работы по проблемам астроботаники (например, «Разработка проблем астроботаники и жизни человека в условиях космического корабля»), реактивных двигателей и межпланетных путешествий («Расчет опытного ракетного двигателя ОР-1»; 1929, 1931). Представлены также работы Ф.А. Цандера «Межпланетные путешествия» (1922–1926), «Расчет полета межпланетного корабля в атмосфере. Подъем» (1924), «Космические корабли, которые должны обеспе-

чить сообщение между звездами. Движение в мировом пространстве» (1908–1912), «Карбюрация горючей смеси для авиационных двигателей» (1916), «Влияние притягательной силы при удалении от планеты» (с материалами по анализу ракеты К.Э. Циолковского; 1919–1924).

Сохранились эскизы и пояснения к проекту составной ракеты, материалы изобретения «Описание межпланетного корабля системы Ф.А. Цандера» (с чертежами, эскизами и основными данными на изготовление модели реактивного аэроплана) и др. В этом же разделе собраны финансовые, геометрические и математические расчеты, записи личного режима Ф.А. Цандера, а также

справочные и подготовительные материалы к работам. В описи № 1 есть и знаменитая афиша о диспуте «Полет на другие миры» и сообщении Ф.А. Цандера, с которым он выступил в 1924 г.

В 1924 г. ученый опубликовал работу «Перелеты на другие планеты», в которой впервые высказал идею использования атмосферы в качестве тормозящей среды и планирующего спуска, что позволит сократить расход топлива. Сохранились варианты этой работы, конспект к статье и конспект к докладу «Перелеты на другие планеты, мои работы в данной области и Обществе изучения межпланетных сообщений»², прочитанному в Ленинграде. В 1930 г. Ф.А. Цандер подготовил доклад для V Международного конгресса по воздухоплаванию в Гааге «Проблемы сверхавиации и очередные задачи по подготовке к межпланетным путешествиям»³.

Среди отзывов Ф.А. Цандера на труды других ученых интересны его отзыв о работах К.Э. Циолковского «Грезы о небе и земле и эффекты всемирного тяготения» и «За атмосферу» с заключением о целесообразности их издания и отрицательный отзыв об изобретении Е.Я. Кизенко «Турболет».

В описи № 2 отложились биографические документы, позволяющие воссоздать его жизненный путь. Это различные свидетельства, документы об учебе (лекционная зачетная книжка и диплом об окончании Рижского политехнического



Афиша о диспуте «Полет на другие миры» и сообщении Ф.А. Цандера. 1924 г. АРАН. Ф. 573. Оп. 1. Д. 240. Л. 8

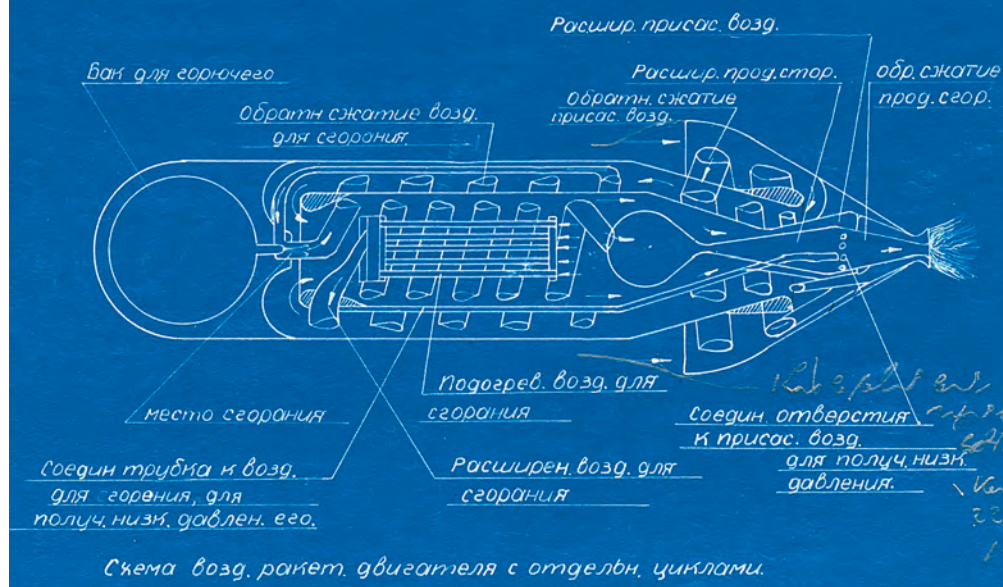
института, свидетельство об окончании Королевского высшего технического училища в г. Данциге), свидетельство о явке к исполнению воинской повинности⁴, билет на право езды на велосипеде по улицам Москвы в 1917 г., заявления, автобиографии, записные книжки, членские билеты, анкеты, записи о бытовых расходах, фотографии (1892–1931), отказ Комитета по делам изобретений ВСНХ РСФСР о выдаче заявочного свидетельства на Междупланетный корабль и объяснение Ф.А. Цандера по пунктам

² Ф.А. Цандер был одним из основателей Общества.

³ Доклад обсудили в ЦАГИ, авиационный инженер профессор В.П. Веточкин высоко оценил оригинальность идей Ф.А. Цандера. Затем доклад послали во Всесоюзное авиаобъединение, где собирались документы для конгресса. В итоге решено было на конгресс никого не посылать, так как ни ВАО, ни ЦАГИ не занимались межпланетными сообщениями.

⁴ Ф.А. Цандер получил отсрочку из-за службы на заводе резиновых изделий «Проводник» в Риге, куда он поступил после окончания института. Решив изучить производство и свойства резины, он посчитал, что в дальнейшем эти знания понадобятся для подготовки космических полетов. С приближением к Риге линии фронта летом 1915 г. завод с персоналом был эвакуирован в Москву, где Ф.А. Цандер оставался до конца жизни.

Черт. 21



Синька к докладу Ф.А. Цандера «Проблемы сверхавиации и очередные задачи по подготовке к межпланетным путешествиям» для представления на V Международном конгрессе по воздушной навигации в Гааге (1–6 сентября 1930 г.). АРАН. Ф. 573. Оп. 1. Д. 164. Л. 78

отказа. Здесь же находятся отзывы ученых на труды Ф.А. Цандера и материалы по увековечению его памяти.

В 1909 г. в Рижском политехническом институте под руководством студента механического факультета Ф.А. Цандера было учреждено Рижское студенческое общество воздухоплавания и техники полета. При поддержке инженера Ф.Г. Калеп⁵ на его заводе студенты института построили балансирный планер (коробчатый биплан с вынесенным назад хвостовым опе-

рением) и начали его испытания под Ригой, прошедшие успешно.

Опись № 3 содержит документы о деятельности Ф.А. Цандера на заводах «Проводник» (1909–1917) и «Мотор» (1919–1930): пропуски, удостоверения, заметки, заявления в заводоуправление Госавиазавода № 4 «Мотор» им. М.В. Фрунзе с просьбой о выделении участка земли для опытов с оранжерей авиационной легкости⁶ и о разрешении оставаться работать после окончания трудового дня над постройкой модели межпланетного корабля; в Институте авиационного моторостроения (1931–1932), Московском обществе любителей астрономии и спорта-авиасекции Мосавиахима, материалы о подготовке доклада для V Между-

⁵ Фёдор Георгиевич Калеп (1866–1913) – российский изобретатель-авиаконструктор, предприниматель и организатор производства, профессор Рижского политехнического института, директор завода «Мотор» в Риге. Один из первых в России конструкторов авиационных двигателей.

⁶ То есть по системе жизнеобеспечения.



Ф.А. Цандер (слева) у планера, построенного членами Рижского студенческого общества воздухоплавания и техники полета. Рига. 1909 г. АРАН. Ф. 573. Оп. 2. Д. 18. Л. 1

народного конгресса по воздушной навигации в Гааге (1930).

В 1931 г. Ф.А. Цандер стал одним из идейных вдохновителей и организаторов секции реактивных двигателей при Бюро воздушной техники Центрального совета Осоавиахима. Вскоре она была преобразована в Группу изучения реактивного движения (ГИРД), работавшую в Москве, Ф.А. Цандер стал ее председателем, а председателем технического совета – С.П. Королёв. Именно Ф.А. Цандер разработал жидкостный двигатель для знаменитой ракеты ГИРД-Х⁷. Ряд документов отражает деятельность ГИРД: извещение

⁷ Ф.А. Цандер умер 28 марта 1933 г., а пуск экспериментальной жидкостной ракеты ГИРД-Х состоялся 25 ноября 1933 г. на подмосковном полигоне Нахабино – работу над его ракетой закончили уже под руководством С.П. Королёва.

об образовании ГИРД и объявление о записи желающих заниматься проектированием и постройкой реактивных двигателей, доклады Ф.А. Цандера «О положении работ в бригаде № 1 на 20 сент[ября] [19]32 г. и о работах, предполагаемых до конца [19]32 г.», «...О работе, проделанной 1 бригадой ГИРД (бригада Цандера) за время 1 окт[ября] по 25 окт[ября] [19]32 года», список оборудования, сорта и качества топлива, необходимые для 1-й бригады ГИРД, сведения из распорядка работы ГИРД, рапорт и докладные записки и др.

Писем, к сожалению, сохранилось мало, всего 30 дел, объединенных в опись № 4. Среди корреспондентов – К.Э. Циолковский, профессора Н.А. Рынин (ЗиВ, 2017, № 6) и В.П. Ветчинкин, один из основателей ГИРД Н.К. Федоренков, секретарь ГИРД И.П. Фортиков.

Продолжение следует

МУЗЕЙ Ф.А. БРЕДИХИНА В ЗАВОЛЖСКЕ. К 190-летию со дня рождения великого астронома

КАСАТКИНА Светлана Вадимовна,

кандидат исторических наук

директор Заволжского городского художественно-краеведческого музея

САЧКОВ Михаил Евгеньевич,

доктор физико-математических наук

заместитель директора Института астрономии РАН

DOI: 10.7868/50044394821030099

Фёдор Александрович Бредихин (1831–1904) – профессор Московского университета, академик, директор Московской и Пулковской обсерваторий, основатель школы русской кометной и метеорной астрономии, один из основоположников астрофизики в нашей стране (ЗиВ, 1982, № 1). Имя Бредихина неразрывно связано с Заволжской землей. В Кинешемском уезде Костромской губернии находилась усадьба Погост, в которой ученый проводил свои астрономические наблюдения, где он сделал наиболее значимые открытия, место, которое когда-то посещала научная элита дореволюционной России. Здесь же (ныне – на территории г. Заволжска Ивановской области) находится семейная усыпальница Бредихиных – памятник федерального значения. Большая коллекция мемориальных вещей из усадьбы Бредихина собрана в Заволжском музее, экспозиция которого рассказывает о жизни и деятельности ученого-астронома.

Усадьба Погост упоминается во многих научных статьях Ф.А. Бредихина и его знаменитых учеников-астрономов П.К. Штернберга, С.К. Кос-



Астроном Ф.А. Бредихин. 1890-е гг.
Фото из фонда ЗГХКМ

тинского, В.К. Цераского – наряду с Пулково, Москвой, Римом, Неаполем. В 1864 г. в усадьбе ученый написал значительную часть своей работы

«Возмущения комет, не зависящие от кометных притяжений». Исследования Бредихина о кометах еще при его жизни вошли в популярные книги, энциклопедии и учебники. С 1872 г. Фёдор Александрович проводил здесь спектроскопические наблюдения Солнца по совместной программе с итальянскими коллегами Анджело Секки и Пьетро Таккини и вел с ними переписку. Для этого он приобрел на свои средства и привез в усадьбу рефрактор Мерца. В Погосте проводились многолетние наблюдения метеорных потоков. Например, во многих выпусках журналов «Анналы московской обсерватории» и «Мемуары общества итальянских спектроскопистов» опубликованы результаты наблюдений Персеид, проведенные с 1878 по 1892 г. в Погосте Бредихиным и Костинским. В 1888–1890 гг. Бредихин и Штернберг провели относительные измерения силы тяжести в средней полосе России, одним из мест их экспедиций и наблюдений была эта усадьба.

В Погосте Ф.А. Бредихиным был сделан литературный перевод трагедии известного итальянского автора Сильвио Пеллико «Франческа да Римини». Об этом он сообщал: «Перевод “Франчески да Римини” сделан мною в 1870 году, в деревне, по возвращению из Италии, где я был в 1869 году. Наша знаменитая артистка Г.Н. Федотова давно как-то просила у меня этот перевод для постановки на сцену; но в ту пору рукопись оказалась затерянною покойным издателем недолговечного журнала Кругозор И.Н. Павловым. Черновую удалось мне найти в прошлом году случайно, в кипе бумаг, оставленных мною у себя в деревне». Перевод пьесы был напечатан в журнале «Русское обозрение» в № 11 за 1897 г.

Погост не был местом рождения астронома: он родился в Николаеве Херсонской губернии. В 1860 г. женился на А.Д. Бологовской, которая получила



Усадебный дом Бредихиных в Погосте.
1910-х гг. Фото из фонда ЗГХКМ

усадьбу Погост в качестве приданого. Но с первого своего визита на Волгу, в имение жены, Ф.А. Бредихин навсегда влюбился в эти места. В одном из писем П.К. Штернбергу он писал: «Вы знаете, я устроился так, что летнее время буду проводить в дорогом Погосте... На ю я не намерен больше ездить, там я болею тоской по родине». Осень и зиму Бредихины проводили в Москве, а летом отправлялись в Кинешемский уезд в усадьбу Погост. Распорядок дня в Погосте зависел от Фёдора Александровича и его научных занятий. Астрономические наблюдения проводились вечером и ночью, поэтому смещались по времени завтрак и обед. Ученый поздно ложился и поздно вставал.

К сожалению, семейное счастье Бредихиных было нарушено в 1888 г., когда погиб их единственный сын Дмитрий. После смерти сына Фёдор Александрович приступил к проектированию семейной усыпальницы. Через 10 лет, в 1898 г., скончалась Анна Дмитриевна. Она также была похоронена в семейном склепе. Каждое лето Ф.А. Бредихин продолжал приезжать в любимый Погост, он умер 4 мая 1904 г. в Петербурге. Тело его было



*Анна Дмитриевна и Фёдор Александрович
Бредихины. 1898 г. Фото из фонда ЗГХКМ*

погребено, согласно завещанию, в фамильном склепе, около церкви Богоявления близ усадьбы Погост. Отметим, что значение русского слова «погост» связано с названием места остановки князя и его дружины во время сбора урока (фиксированный размер дани или каких-либо работ, которые должны были быть выполнены к определенному сроку) – «погостье» (постоялый двор). Позднее так стали называть центры небольших поселений. И уже значительно позднее у слова появилось так же всем известное сейчас значение «сельское кладбище».

После революции 1917 г. Погост постигла судьба многих русских усадеб. Разграбленная, она служила в качестве общежития, детского сада, конторы подсобного хозяйства химического завода.

Память о Ф.А. Бредихине в Заволжье сохранилась во многом благодаря местным краеведам. Среди них – Николай Кузьмич Смирнов (1907–1969). Совсем недавно материалы о нем были впервые опубликованы О.Д. Телковой (Смирнов Н.К. В лесах смоленских. По материалам архива Н.К. Смирнова.

Автор-составитель Телкова О.Д. Иваново, 2020; Телкова Елена «Современники Ф.А. Бредихина (по материалам первого краеведа г. Заволжска Николая Кузьмича Смирнова)». Краеведческая работа, 2018 г.).

Он забил тревогу о возможной гибели семейного склепа Бредихиных в 1940 г. Склеп находился рядом с Богоявленским храмом в Заволжье. В июне 1939 г. Президиум Иванов-

ского облисполкома принял решение «Богоявленскую церковь как молитвенное здание ликвидировать и передать Кинешемскому райисполкому для использования под культурные цели». Чугунная ограда склепа была продана поселковым советом по договору кинешемской организации «Металлолом», а сам склеп было решено



*Склеп Ф.А. Бредихина в Заволжье.
Фото 2010 г.*

сломать, кирпич использовать для строительства. Н.К. Смирнов написал 9 апреля 1940 г. письмо в Пулковскую астрономическую обсерваторию с целью найти подтверждение захоронения астронома около Богоявленского храма и спасти семейную усыпальницу от уничтожения. Ответ пришел 25 апреля, в нем говорилось: «Уважаемый товарищ Смирнов! Ваше сообщение о месте похорон знаменитого русского астронома Фёдора Александровича Бредихина соответствует действительности. ...Главная Астрономическая Обсерватория выражает Вам свою признательность за Ваше письмо и Вашу инициативу в вопросе сохранения склепа Бредихина. Соответствующие шаги в этом направлении будут предприняты и с нашей стороны. Ученый секретарь ГАО А.М. Лейкин».

Своевременное вмешательство краеведа Н.К. Смирнова позволило сохранить этот исторический памятник для потомков. Ответ из Пулковской обсерватории и предпринятые меры в 1940 г. не позволили уничтожить семейную усыпальницу Бредихиных в Заволжске.

30 августа 1960 г. было принято Постановление Совета Министров РСФСР № 1327, в котором указывалось, что склеп Ф.А. Бредихина и дом, в котором он жил, являются памятниками федерального значения.

Идея создания музея Бредихина в его бывшей усадьбе была реализована только в 1960-е гг. По инициативе директора Заволжского химического завода Виктора Эмильевича Рейнфарта в 1963 г. в одной из комнат бывшего усадебного дома была создана экспозиция на астрономическую тему с использованием материалов из жизни ученого. Не случайно интерес директора химического завода к личности Ф.А. Бредихина. Здание бывшей усадьбы Погост было в то время на балансе химзавода. В доме размещались детский сад, контора подсобного

хозяйства. Нашлось место и для первой экспозиции музея.

Открытие музея предшествовала большая подготовительная работа. От имени химзавода были подготовлены письма с просьбой об оказании методической помощи в Московский планетарий, Пулковскую и Московскую обсерватории. В числе организаторов музея был инженер химзавода Николай Николаевич Минаев. На его имя 8 апреля 1962 г. пришло письмо из Москвы от Виталия Алексеевича Шишакова. Он сообщал: «Официальная заявка вашего завода увенчана решением дирекции [Московского планетария] командировать к Вам В.К. Луцкого... После того, как он у вас побывает, я составлю с ним окончательный вариант оформления возможных экспозиций. Получили ли Вы мой предварительный план? Посылаю Вам сохранившуюся у меня копию». Виталий Алексеевич Шишаков – почетный член Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО), кандидат педагогических наук, известный пропагандист и популяризатор астрономии, один из первых лекторов Московского планетария, инструктор и методист, научный консультант, автор множества научно-популярных книг и брошюр, первый руководитель и постоянный член Совета астрономических кружков планетария. При поддержке сотрудников Московского планетария был подготовлен план первой экспозиции музея Бредихина, при музее был создан общественный совет.

Комната-музей Бредихина в бывшем усадебном доме в Погосте была открыта 9 октября 1963 г. На мероприятии присутствовало более 50 человек. Сохранился акт об открытии музея, в котором названы участники мероприятия: заведующий Кинешемским отделом культуры Е.Н. Калининченко, секретарь парткома химзавода Г.И. Гусев, директор Кинешем-



Открытие музея Ф.А. Бредихина в Погосте. 1963 г.

ского музея Т.К. Смирнова, директор Кинешемской художественной мастерской И.И. Шалин, инженер химзавода Н.Н. Минаев, секретарь комитета ВЛКСМ химзавода Н. Соловьева, пенсионер И.С. Смирнов. В протоколе собрания общественности отмечалось, что вступительное слово сделал директор Заволжского химического завода В.Э. Рейнфарт, который поделился планами по развитию музея. Он сказал: «Сам буду помогать музею. Занимаясь дальнейшей организацией музея, нужно продолжать связь с Пулковской обсерваторией, Московской обсерваторией и планетарием Москвы. Нам нужно на заводе в здании РУ-4 [ремесленное училище находилось в здании бывшего особняка владельцев химического завода Бурнаевых-Курочкиных] построить небольшой планетарий, сейчас нам его готовят. Клуб завода должен возглавить

работу над музеем, а руководить будет общественный совет музея. Нужно также поработать с людьми, которые помогут в сборе экспонатов и узнают что-либо о Бредихине».

Доклад о жизни и деятельности Ф.А. Бредихина прочитала директор Кинешемского музея Т.К. Смирнова. На митинге выступили организаторы музея. Инженер химзавода Н.Н. Минаев отметил: «Сейчас мы присутствуем на открытии музея. В дальнейшем предстоит поработать над сбором дополнительных материалов, экспонатов. Необходимо в музее оформить раздел под названием “Достижения советских людей в освоении космоса”, а также считать склеп Бредихина составной частью музея». Ветеран войны Н.К. Смирнов отметил: «Наша мечта сбывается. Мы открываем музей Бредихина. В этом доме, где мы присутствуем, Бредихин делал наблю-

дения за солнцем. Заслуги Бредихина велики. Но нам еще нужно поработать, собрать экспонаты, изучить отношения местного населения к Бредихину при его жизни. Старожилы говорят, что Бредихин был добрым, отзывчивым».

В то время среди жителей Заволжска были люди, которые еще помнили окружение Бредихина. На открытии музея присутствовал пен-

сионер И.С. Смирнов. Он вспоминал: «Бредихина лично я не знал, но был знаком с управляющим в имении Погост Д.А. Маровым. По его словам, Бредихин был весьма отзывчивым, мягким на любое крестьянское горе. Бредихин помогал крестьянам в беде, никому не отказывал. Из прислуги Бредихина, вероятно, жива жена Марова, у нее, видимо, есть письменный прибор, принадлежащий Бредихину. Кое-что из вещей я помогу найти».

Сотрудники музея подготовили к открытию семь отделов:

1. Начало научной деятельности Ф.А. Бредихина;
2. Бредихин Ф.А. – директор Московской обсерватории;
3. Механическая теория кометных форм;
4. Ф.А. Бредихин – крупнейший русский астроном;
5. Метеорные потоки и их связь с кометами;
6. Бредихин и современная кометная астрономия;
7. Последние годы жизни.

Сохранился отчет за первый год работы комнаты-музея. Из него видно, что музей работал два раза в неделю, всего музей посетило 486 человек, проведено 20 экскурсий. На вопрос: «Какие отзывы о музее?» дан ответ: «Хорошие. Пополнять. Как работал при царе». Скорее



*Зрители на открытии комнаты-музея
Ф.А. Бредихина в 1963 г.*

всего писавшие имели в виду, что здание усадьбы должно быть музеем и выглядеть как «при царе».

В 1965 г. состоялось заседание, на котором был избран новый общественный совет музея. Председателем совета вместо Н.Н. Минаева был избран культработник А.К. Бубнов. Кроме него в общественный совет вошли 7 человек: директор совхоза Г.М. Капустин, разнорабочий Ю.В. Максимов, секретарь директора совхоза В. Соловьёва, инженер химзавода Н.Н. Минаев, плановик совхоза Н.П. Пономарёва, пенсионеры И.С. и А.С. Смирновы.

Намеченные планы музея не были выполнены, что вполне очевидно, так как основу музея составили работники совхоза, у которых хватало своих проблем, и место в совете по большей части они занимали формально. В определенные дни на несколько часов музей открывался, но экскурсии не проводились. Посетители самостоятельно осматривали экспозицию и делали затем записи в книге отзывов, например, сделанные Ниной Александровной Зарудной – внучатой племянницей Ф.А. Бредихина. Она побывала в музее 15 августа 1964 г. и написала:

«Комнату-музей Ф.А. Бредихина посетила внучка его и выражает благодарность основателям музея за память о Ф.А. Бредихине и за распространение его научных работ. Хорошо, конечно, будет, если музей будет пополняться экспонатами». Она передала музею мемориальные вещи астронома, были записаны ее воспоминания и пересказы воспоминаний ее бабушки, которая была сестрой Ф.А. Бредихина.

В 1971 г. в музее побывали астрономы – участники астрономической конференции, в том числе директор ГАИШ МГУ академик Д.Я. Мартынов, которые сделали следующую запись: «В год, когда со дня рождения Ф.А. Бредихина исполнилось 140 лет, снова пришли мы – группа советских астрономов, собравшихся накануне в Кинешме на необычную конференцию в честь нашего выдающегося учителя, основоположника русской астрофизики. Мы посетили фамильный склеп, где погребен Ф.А. Бредихин, и здесь, в этой комнате, выражаем наше горячее желание видеть дом-музей Ф.А. Бредихина в том состоянии, в котором он был при жизни и в расцвете деятельности этого выдающегося представителя отечественной науки». Память о Бредихине сохранялась не только в общественном музее, но и среди астрономов, которые не только приезжали в Заволжье и посещали семейную усыпальницу, но и проводили в Кинешме «необычную конференцию».

28 июня 1971 г. в музее Бредихина побывал знаменитый советский астроном президент АН Армянской ССР академик В.А. Амбарцумян с женой Верой Фёдоровной. В книге ими сделана запись: «Приехали и поклонились праху Ф.А. Бредихина и дому, в котором жил великий русский астроном». Записи в книге отзывов заканчиваются 1971 г. и до 1981 г. о музее не вспоминали: экспонаты были заперты в комнате, посетителей не было.



София Петровна Волкова – энтузиаст и организатор музея

Инициатива возрождения музея Ф.А. Бредихина в 1980 г. принадлежала местным властям и общественности города. В это время в Заволжье начала работать София Петровна Волкова – энтузиаст и организатор музея, почетный гражданин г. Заволжска и Заволжского района. Вот как вспоминала она встречу с заместителем председателя Заволжского исполкома Г.В. Кандалинцевой: «Я к ней пришла попросить материал для доклада о современном Заволжье. Разговорились. Я высказала свою боль за скверное состояние бредихинского дела. Она сделала предложение заняться восстановлением музея астронома. А дальше уже началась работа в архивах, библиотеках, поиски, встречи и так далее». В возрождении музея активное участие принимали первый секретарь Заволжского райкома КПСС Аvenir Дмитриевич Горин, второй секретарь райкома КПСС Александр Иванович Нечаев, председатель городского совета Анатолий Алексеевич Носов, директор Заволжского химического завода Михаил Герасимович Афонин. Под музей в особняке усадьбы отвели уже две комнаты.

7 мая 1981 г. было принято постановление бюро Заволжского райкома КПСС и исполкома районного совета народных депутатов, согласно которому в городе был создан организационный комитет, возглавивший всю работу

по возрождению музея. Воссозданный музей Бредихина был открыт 8 декабря 1981 г. Открытие музея было приурочено к 150-летию со дня рождения ученого. В это время в Москве Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ) тоже отмечал эту памятную дату. В столицу были приглашены и создатели музея в Заволжске. Ученые-астрономы В.В. Радзиевский из Горького, В.А. Бронштэн – ученый секретарь ВАГО, П.Г. Куликовский проявили интерес к музею и его начинаниям.

Осенью 1983 г. по инициативе Горьковского отделения ВАГО и его председателя В.В. Радзиевского в городе Заволжске на базе музея прошли Первые Бредихинские чтения. Они были организованы Центральным советом ВАГО, Институтом теоретической астрономии АН СССР и рабочей группой Астрономического совета АН СССР «Динамика

малых планет и комет». К этому времени еще раз была расширена и обновлена экспозиция музея Ф.А. Бредихина. Активную помощь в этом оказал Ивановский историко-революционный музей. В сентябре 1992 г. на базе музея прошли Четвертые Бредихинские чтения.

«Все эти годы, – вспоминала С.П. Волкова, – велась борьба за установление государственного статуса музея, за выделение средств на реставрацию всей усадьбы». Удалось добиться только выделения ставки методического работника сельского клуба (52 рубля).

Усадебный дом, построенный в первой трети XIX века, не ремонтировался и ветшал. На тот момент сохранились хозяйственные постройки, парк, система прудов. В конце 1980-х гг., по словам С.П. Волковой, «усадьба находилась в критически запущенном состоянии. Еще десяток лет и она погибнет. От некогда роскошного парка



Здание музея Ф.А. Бредихина в Заволжске. Современный вид.



Гостиная Бредихиных в музее и экспозиция, посвященная Ф.А. Бредихину. 2014 г.

оставались единицы живых деревьев, пруды зарастали, здание при варварской эксплуатации разрушалось». В ночь с 20 на 21 ноября 1994 г. в музее произошел пожар. В результате пожара сгорела крыша и часть перекрытий бывшего усадебного дома, но главные экспонаты удалось спасти. Сильно пострадали астрономические издания XIX в. После пожара все экспонаты музея были перевезены в картинную галерею Заволжска.

С ноября 1994 г. по ноябрь 2007 г. в Заволжске существовал общественный музей, который объединял четыре коллекции. Одна из коллекций –

это уцелевшие от пожара вещи и документы музея Ф.А. Бредихина. 16 ноября 2007 г. Заволжский музей получил статус муниципального учреждения культуры.

28 апреля 2014 г. в музее была открыта новая экспозиция «Жизнь и научная деятельность Ф.А. Бредихина». Здесь представлены мемориальные вещи, мебель, астрономические приборы, фотографии и документы, посвященные жизни и деятельности ученого, прижизненные научные статьи и литературные переводы, виды усадьбы Погост. Уникальным экспонатом является телескоп Мерца, с его помощью в усадьбе Погост ученый впервые в России проводил наблюдения над Солнцем.

Кладовая памяти любого музея – это его запасники. Фонд Ф.А. Бредихина является составной частью

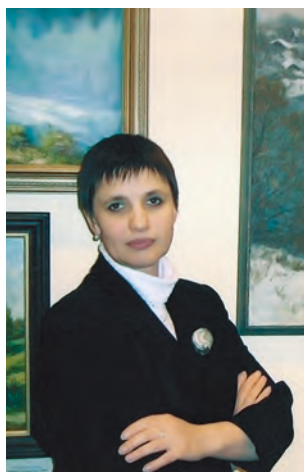
фонда заволжского музея и насчитывает сегодня 1145 единиц хранения. Выделим наиболее ценные: астрономические приборы, принадлежавшие Ф.А. Бредихину, предметы из семьи Бредихиных, подаренные Н.А. Зарудной, картины В. Пчелина с видами усадьбы Погост (1890), мебель из усадебного дома, книги, брошюры, оригиналы статей ученого на иностранных языках, фотографии Ф.А. Бредихина, его родственников и астрономов, с которыми он работал, старые виды г. Николаева, усадьбы Солониха (присланы в 2013 г. музеем Николаева), переписка с астрономами, его родственниками,

с последними владельцами усадьбы Погост (потомками Шулепникова).

Среди почетных дарителей музея – автор статьи М.Е. Сачков, почетный гражданин г. Заволжска, организатор Бредихинских чтений. Им переданы в дар 239 единиц: издания XIX в. со статьями Ф.А. Бредихина, книги по астрономической тематике. В 2013 г. к 110-летию со дня смерти знаменитого российского астронома и к проведению международной астрономической конференции Пятые Бредихинские чтения издательство «Планета» выпустило книгу «Фёдор Александрович Бредихин», авторы-составители – С.В. Касаткина и М.Е. Сачков.

Одной из составляющих сохранения экспонатов является реставрация. Планомерно в музее проводится реставрация предметов фонда, в первую очередь пострадавших в результате пожара 1994 г. Экспонаты реставрируются в Костромском филиале реставрационного центра им. И.Э. Грабаря. В настоящее время отреставрировано 10 предметов: картины, часы, мебель, посуда.

В результате исследований при подготовке материалов удалось установить точную дату рождения ученого – 1 декабря (по старому стилю) 1831 г. Сотрудниками музея был обнаружен документ – свидетельство о рождении Ф.А. Бредихина. Оригинал хранится в Санкт-Петербургском филиале архива Российской академии наук (Ф. 705. Оп. 1. Д. 6. Л. 2). Копия с него была сделана для экспозиции музея и представлена зрителям. Крещен Бредихин был в Адмиралтейском Свято-Григорьевском соборе г. Николаева (Украина). Собор не сохранился,



Директор Заволжского городского художественно-краеведческого музея С.В. Касаткина. Обложка книги «Фёдор Александрович Бредихин», авторы-составители – С.В. Касаткина и М.Е. Сачков



Телескоп Мерца в экспозиции Ф.А. Бредихина. 2014 г.



*Открытие Первых Бредихинских чтений
в Заволжье. 1983 г.*

он был разрушен в 1936 г. С помощью сотрудников музея в Николаеве удалось найти описание и старые фотографии собора, которые тоже представлены в экспозиции.

Большую помощь при составлении родословной Бредихиных оказал Литературный музей А.С. Пушкина в Москве. В 2009 г. часть копий документов была передана заволжскому музею на безвозмездной основе. В этом музее хранится коллекция личных вещей из семьи Бредихиных, переданная А.С. Головиной.

Ежегодно в музее 14 мая отмечает День памяти Ф.А. Бредихина. В этот день в семейной усыпальнице проходит панихида, а в музее проводятся мероприятия, посвященные ученому. С целью популяризации астрономических наблюдений среди населения города и района, а также с целью наблюдения астрономических явлений в нашей полосе в 2008 г. музей приобрел телескоп. Наблюдения проводит астроном-любитель Н.К. Гусев.

С 2016 г. он отправляет результаты и съемки комет в Международную базу кометных наблюдений, размещает результаты наблюдений на сайте музея и в соцсетях.

Ежегодно сотрудники музея выступают с докладами на различных конференциях, читают лекции о Ф.А. Бредихине. Музей проводит большую работу по подготовке и изданию книг, посвященных астроному. Вышли в свет издания «Федор Александрович Бредихин» (2014),

«Литературные переводы Ф.А. Бредихина» (2016). Ивановская ГТРК совместно с музеем создала фильм «Усадьба Погост».

С восстановлением экспозиции музея Ф.А. Бредихина возродилась традиция проведения Бредихинских чтений. Институт астрономии РАН, администрация города Заволжска и Заволжский музей приняли решение провести в мае 2014 г. Пятые Бредихинские чтения (ЗиВ, 2015, № 2). Для участия в международной конференции приехали ученые из России, Финляндии, Украины, Azerbaijan, Таджикистана, Словакии. Основные темы конференции были посвящены кометам и метеорам. В сентябре 2017 г. состоялись Шестые Бредихинские чтения, среди ее участников были ученые из Azerbaijan, Бельгии, Испании, России, Словакии, Таджикистана, Финляндии и Чехии, три члена-корреспондента РАН, 16 докторов наук, 21 кандидат наук. Седьмые Бредихинские чтения запланировано провести в Заволжье 24–28 мая 2021 г.

В апреле 2020 г. Заволжский музей принял участие во всероссийском конкурсе-проекте идей новых

достопримечательностей «Культурный след». Это проект, позволяющий силами местных жителей создавать новые достопримечательности, развивать культурную среду и внутренний туризм в небольших городках. Конкурс реализуется на средства Фонда президентских грантов по направлению: развитие институтов гражданского общества. Всего конкурс объединил более 800 участников из 64 регионов России. Экспертный совет выбрал пять проектов-победителей, в числе которых была заявка Заволжского музея на «Памятник ученому-астроному Ф.А. Бредихину» художника Леонида Тишкова. Идею установить памятник (арт-объект) знаменитому земляку признали лучшей. 29 декабря 2020 г. в Заволжске на площади Бредихина состоялось торжественное открытие арт-объекта.

Музей продолжает свою исследовательскую и популяризаторскую работу.



Арт-объект, посвященный Ф.А. Бредихину в Заволжске. 2020 г.

Ждет своего решения проблема восстановления усадьбы Погост. Существует идея создания астрономического центра в Заволжске.

ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожанный переплет
Рельефное тиснение
Клише любой сложности
Полноцветная роспись обрзов
А также адресные папки, дипломы, футляры

Берёмся за работы любой сложности!
По всем интересующим вопросам пишите на почту kiseleva@tnauka.ru

реклама

EARTH & UNIVERSE

3 (339), 2021

May–June

TABLE OF CONTENT:

Lev M. ZELENYI Editorial	3
Oleg R. KOTSURBENKO Is Their Life On... Venus?	6
Alexandr S. TSVETKOV The Advances of Modern Astrometry	21
Maria M. KATSOVA, Dmitry D. SOKOLOV Solar and Stellar Activity: Waiting for Surprises	39
Alexandr V. IPATOV, Leonid A. VEDESHIN Future For Radio Telescopes, on the Earth and in Space	52

OBSERVATORIES, INSTITUTES

Stanislav Yu. GORDA, Andrei M. SOBOLEV, Eduard D. KUZNETSOV Kourouva, the Observatory and the Asteroid	66
---	----

PEOPLE OF SCIENCE

Roald Z. SAGDEEV, Lev M. ZELENYI, Sergey I. POPEL Academician Vladimir Fortov and International Project Vega	76
---	----

HISTORY OF SCIENCE

Olga V. SELIVANOVA Rocket Pioneers. Documents from Private Collection of Friedrich Tsander, Archive of the Russian Academy of Sciences	92
---	----

EXHIBITIONS AND MUSEUMS

Svetlana V. KASATKINA, Mikhail E. SACHKOV F. A. Bredikhin Museum in Zavolzhsk. To the 190 th Anniversary of the Great Astronomer	98
Table of Content and Selected Abstracts	110

EARTH & UNIVERSE

3 (339), 2021

May–June

Is Their Life On... Venus?

Oleg R. KOTSURBENKO

Yugra State University

DOI: 10.7868/S0044394821030014

For a long time Venus has not been among space bodies to search for life on. Extremely high temperature and pressure on its surface, the atmosphere made of fine droplets of sulphuric acid were seemingly unsuited for Earth-type organisms to live in. However, new data and theoretical models made Venus more significant for astrobiologists. Of main interest is Venusian cloud deck, 20–25 km thick. In spite of harsh environment, some of the Earth microorganisms – so-called extremophiles – could have survived there. Astrobiological experiments are envisaged in the Russian space program of Venus studies, which includes sending spacecraft to the planet in 2028–2030s. The goals of these experiments are to look for various biomarkers in the clouds, to answer the question whether there is life on Venus?

The Advances of Modern Astrometry

Alexandr S. TSVETKOV

St. Petersburg University

DOI: 10.7868/S0044394821030038

The author reviews the results of astrometric studies that have been collected within last two millennia, comprehensive star catalogues and modern space astrometric missions as *Hipparcos* and *Gaia*.

Solar and Stellar Activity: Waiting for Surprises

Maria M. KATSOVA¹, Dmitry D. SOKOLOV^{2, 3}

¹ Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University

² Lomonosov Moscow State University

³ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394821030026

The Sun is a large magnet. Its magnetic field reverses its polarity approximately once every eleven years during the famous 11-year long cycle of solar activity. Certainly, other stars should have similar cycles of magnetic activity. Studying these astronomers begin to understand solar activity better and also find various differences between the two.

Индекс 70336

Земля и Вселенная, 3/2021

Заведующая редакцией А.Ю. Обод

Редакторы С.А. Герасютин, О.В. Закутняя, Д.А. Кононов

Корректор С.О. Розанова

Верстка макета Н.В. Мелкова

Просим обращаться

по вопросам публикации материалов:

(495)276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukaran.com

по вопросам сотрудничества:

(495)276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),

e-mail: journals@naukaran.com

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/

Все права защищены.

Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.

Ответственность за точность и содержание рекламных материалов несут рекламодатели

12+

Сдано в набор 22.03.2021 г. Подписано к печати 28.04.2021 г.

Дата выхода в свет 14.05.2021 г. Формат 70 × 100¹/₁₆

Цифровая печать Усл.печ.л. 9.75 Уч.-изд.л. 10.0 Бум.л. 3.75

Тираж 1000 экз. Зак. 9 Цена свободная

Учредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 90

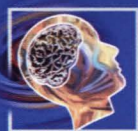
Отпечатано в типографии ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 121099 Москва, Шубинский пер., 6

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru

Е.А. Косенко

**ЗАГАДКА
АЛОИЗА
АЛЬЦГЕЙМЕРА**



Почему в XXI веке
болезнь Альцгеймера
неизлечима?

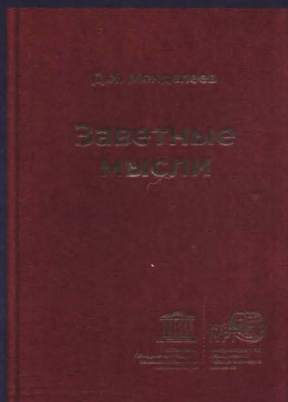
Косенко Е.А.

**Загадка Алоиза Альцгеймера. Почему в XXI в.
болезнь Альцгеймера неизлечима?**

М.: Наука, 2019. — 319 с.

В монографии изложена актуальнейшая на сегодняшний день медико-биологическая проблема, связанная с болезнью Альцгеймера (БА), и предпринята попытка ответить на вопрос: почему заболевание, известное с начала XX в. и на изучение которого тратятся триллионы долларов, в настоящее время все еще остается неизлечимым, а имеющиеся антиамилоидные препараты приносят больше вреда, чем пользы? Для объяснения механизмов, лежащих в основе нейродегенерации при БА, формулируется «эритроцитарная гипотеза», согласно которой эритроциты рассматриваются не просто как клетки, переносящие кислород, а как клетки, от эндогенного метаболизма которых зависит адекватная доставка кислорода в ткани, и в частности в мозг. Именно функциональное несоответствие между эритроцитами и биоэнергетикой мозга, считает автор, лежит в основе гибели нейронов.

Книга может быть интересна широкому кругу читателей – студентам, обучающимся по специальностям «биология», «биомедицина», а также физиологам, биохимикам научно-исследовательских лабораторий, преподавателям высших образовательных медицинских и биологических учреждений.



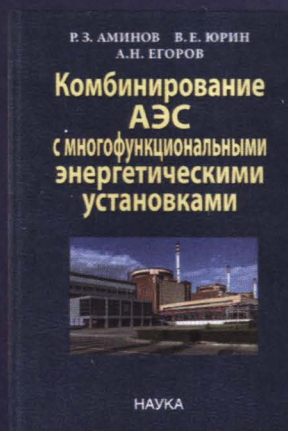
Менделеев Д.И.

Заветные мысли.

М.: Наука, 2019. – 310 с.

Д.И. Менделеев в работе «Заветные мысли» рассуждает о желательных, на его взгляд, путях развития России в геополитической, экономической и научной областях. Круг анализируемых ученым вопросов чрезвычайно широк: государственное устройство, образование, народонаселение, внешняя торговля, взаимосвязь между просвещением и национальным богатством, баланс между промышленностью и сельским хозяйством и т.д. По существу, «Заветные мысли» – духовное завещание Д.И. Менделеева потомкам.

Для широкого круга читателей.



Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н.

Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками.

М.: Наука, 2018. – 238 с.

В работе предложен новый взгляд на повышение безопасности АЭС. Разработаны и исследованы многофункциональные системы, включающие такие установки, как дополнительная паровая турбина, тепловые аккумуляторы, водородный комплекс и газотурбинные установки, позволяющие обеспечить надежное электроснабжение собственных нужд АЭС в аварийных ситуациях с обесточиванием. Исследован способ использования остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР для генерации электроэнергии, необходимой для отвода остаточного тепловыделения в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Разработана система уравнений и построены скелетные таблицы свойств диссоциированного водяного пара, которые позволяют проводить промышленные термодинамические расчеты параметров рабочего тела водородных циклов. Исследованы процессы сжигания водорода в кислородной среде, а также определены ресурсные показатели основного оборудования водородного энергокомплекса, работающего в циклических режимах.

Для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов теплоэнергетических специальностей.

naukabooks.ru



“Наука”
Индекс 70336